

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

BRUNA MAIDEL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES VERTICAIS: ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE CLT (CROSS-LAMINATED TIMBER), E ALVENARIAS  
CONVENCIONAIS A PARTIR DO PROJETO EM BIM

CURITIBA

2020

BRUNA MAIDEL

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES VERTICAIS: ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE CLT (CROSS-LAMINATED TIMBER), E ALVENARIAS  
CONVENCIONAIS A PARTIR DO PROJETO EM BIM

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia,  
Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia de Construção  
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

M217a      Maidel, Bruna  
Avaliação do ciclo de vida de edificações verticais: estudo comparativo entre CLT (Cross-Laminated Timber), e alvenarias convencionais a partir do projeto em BIM [recurso eletrônico] / Bruna Maidel. – Curitiba, 2020.  
Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2020.  
Orientador: Sérgio Fernando Tavares.  
1. Modelagem de informação da construção. 2. Lâminas de madeira. I. Universidade Federal do Paraná. II. Tavares, Sérgio Fernando. III. Título.

CDD: 690.0285

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049F2

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **BRUNA MAIDEL** intitulada: **AValiação DO CICLO DE VIDA DE EDIFICAÇÕES VERTICAIS: ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CLT (CROSS-LAMINATED TIMBER) E ALVENARIAS CONVENCIONAIS A PARTIR DO PROJETO EM BIM.**, sob orientação do Prof. Dr. SÉRGIO FERNANDO TAVARES, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 24 de Março de 2020.

Assinatura Eletrônica

02/04/2020 18:41:47.0

SÉRGIO FERNANDO TAVARES

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/04/2020 13:18:11.0

SÉRGIO SCHEER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/04/2020 18:32:39.0

DIMAS AGOSTINHO DA SILVA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal do Paraná pela oportunidade de aprofundar os estudos, juntamente com toda a estrutura necessária para tal.

Aos professores do programa de pós-graduação- PPGECC que sempre estiveram disponíveis, auxiliando no pensamento científico e crítico necessário para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, prof. Dr. Sérgio Fernando Tavares, pela dedicação, paciência e pensamento crítico, sempre disposto a auxiliar da melhor maneira possível.

Aos colegas de mestrado, por estarem, mesmo de longe, sempre presentes ao longo desta jornada.

Aos colegas de trabalho, pelo carinho, incentivos e auxílio na tomada de decisão ao longo destes dois anos.

À família, pela compreensão e incentivo ao longo destes dois anos de muitas viagens à Curitiba e ausências para que esta dissertação fosse concluída.

À Deus por me dar força para concluir este trabalho.

## RESUMO

O setor da construção civil está entre os principais responsáveis pelo consumo de materiais, energia e emissão de gases no mundo, todavia, com o incremento do uso de tecnologias aplicadas a construção é possível que estes gastos e emissões sejam previstos e mitigados ainda durante o projeto. Neste sentido, a difusão do uso de BIM (*building information modeling*), permite aos projetistas simular a edificação segundo diversos critérios, dentre eles o ambiental. Desta maneira, a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) da edificação é uma ferramenta que avalia os impactos ambientais ao longo da vida útil de uma edificação. A madeira é um material natural, de fonte renovável e que faz o sequestro de carbono durante seu processo de crescimento, portanto, é importante destacar que novas tecnologias que utilizem a madeira como matéria prima tem o potencial de minimizar os impactos do ambiente construído, tais como o CLT – *Cross-Laminated Timber*, que consiste em painéis autoportantes elaborados em um número ímpar de camadas de tábuas coladas perpendicularmente à camada anterior. Esta pesquisa tem como objetivo simular por meio de ACV integrada à BIM qual o impacto de edificações verticais que utilizem diferentes materiais como estrutura e vedação, incluindo o CLT. Foram elaborados três modelos de uma mesma edificação, em CLT, concreto armado e blocos cerâmicos e em bloco de concreto em *Revit* a partir do modelo R8-B do CUB (SINDUSCON MG, 2007) para este estudo comparativo. Os resultados apontam para uma redução de até um terço do peso da edificação em CLT, redução do potencial de aquecimento global em até 4,6 vezes os valores dos outros modelos, devido ao armazenamento de carbono na madeira, e em redução do consumo de energias primárias. Desta maneira, o CLT pode se tornar uma alternativa viável a construção de edificações mais sustentáveis no Brasil, sendo a absorção da produção do painel pela indústria nacional e o conhecimento da aplicação do material alguns dos desafios para a expansão de seu uso. É ainda uma conclusão desta pesquisa que a integração entre BIM e ACV permite aos projetistas a análise do projeto segundo critérios ambientais ainda durante suas primeiras etapas e, conseqüentemente, sua utilização como critério de decisão de projetos.

Palavras-chave: Avaliação do Ciclo de Vida. Building Information Modeling. Cross-Laminated Timber. Revit. Green Building Studio. Tally.

## ABSTRACT

The building sector is one of the main responsables fo the material consumption, energy and gases emition in the world, however, with the increasing use of technologies applied to building it is possible to have this wastes and emitions predicted and reduced still during the building design. In that sense, the use of BIM (*building information modeling*) allows building designers to simulate the building according to many criterion, like the environmental one. This way, the building Life Cycle Assessment (LCA) is a tool that evaluate the environmental impacts during the building life cycle. The wood is a natural and renewable material that sequestrate the carbon during the trees growth process, in that sense, it is important to highlight the reduction of the building impacts by using materials where the wood is the main raw material, like the CLT – *Cross-Laminated Timber*, that consists in self-supporting panels in na impar number of layers glued perpendicularly to the layer before. The aim of this study is to make a LCA simulation integrated in BIM to measure the vertical building impact according to the use of different building materials used as structure and sealing. Three models of the R8-B building from CUB (SINDUSCON MG, 2007) were elaborated in *Revit*, the first using CLT, the second concrete and ceramic bricks and the third concrete blocks. The result pointed the one third reduction of the building weight in wood, 4.6 times of reduction of the Global Warmming Potential and the consume reduction of the Primary Energy because of the carbon storage in wood. This way, the CLT could become a viable alternative to make the building construction sector more sustainable in Brazil, since the national industry production and the material especification for building designers are solved. It is still a reseach conclusion that the integration of BIM and LCA allows building desingners to analyze the project according to environmental criterion at the begining of the project and to use it as a decision criteria.

Key-words: Life Cycle Assessment. Bulding Information Modeling. Cross-Laminated Timber. Revit. Green Building Studio. Tally.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL .....	25
FIGURA 2 - ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL DISTRIBUÍDAS POR ESTADO E POR GÊNERO ....	26
FIGURA 3 – CONFIGURAÇÃO DAS CAMADAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DA MADEIRA EM CLT .....	31
FIGURA 4 – INDICAÇÃO DE REDUÇÃO DE DIMENSÃO DAS FUNDAÇÕES REQUERIDAS EM UMA EDIFICAÇÃO DE CONCRETO EM RELAÇÃO A MESMA EDIFICAÇÃO EM CLT, O CASO DO DALSTON WORKS BUILDING .....	42
FIGURA 5 A E 5 B – ESTRUTURA DE CLT EM BALÃO E EM PLATAFORMA.....	43
FIGURA 6 – VÃO LIVRE DE EDIFICAÇÕES EM CLT E SOLUÇÕES COM COMBINAÇÕES HÍBRIDAS .....	46
FIGURA 7 A, 7 B E 7 C – EDIFÍCIOS STADTHAUS, PARTE DO COMPLEXO VIA CENNI E EDIFÍCIO ORIGINE.....	54
FIGURA 8 – ESQUEMA ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO ORIGINE.....	58
FIGURA 9 A E 9 B – TORRES DE RESIDÊNCIAS DE ALUNOS DA UBC (A) BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE (B) PONDEROSA COMMONS CEDAR HOUSE.....	74
FIGURA 10 – PLANTA BAIXA PAVIMENTO TIPO R8-B (SEM ESCALA).....	83
FIGURA 11 – CORTE DA EDIFICAÇÃO TIPO R8-B (SEM ESCALA).....	84
FIGURA 12 – MODULAÇÃO E ALTERAÇÕES NA PLANTA TIPO DA EDIFICAÇÃO R8-B (SEM ESCALA).....	87
FIGURA 13 A E 13 B – SEÇÃO TIPO DAS PAREDES EXTERNAS E INTERNAS DO MODELO EM CLT .....	90
FIGURA 14 –DISTRIBUIÇÃO DOS PAINÉIS DO MODELO EM CLT.....	91
FIGURA 15 – MODELO EM CLT .....	92
FIGURA 16 A E 16 B – SEÇÃO TIPO DAS PAREDES EXTERNAS E INTERNAS GERAIS DO MODELO EM CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO .....	94
FIGURA 17A E 17B - SEÇÃO TIPO DAS PAREDES EXTERNAS E INTERNAS DO MODELO EM BLOCO DE CONCRETO.....	96
FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL DENTRO DO CENTRO POLITÉCNICO - UFPR.....	99
FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO PROJETO E DAS PRINCIPAIS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS CADASTRADAS EM REVIT 2019.....	100
FIGURA 20 - INSERÇÃO DE CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS EM <i>REVIT 2019</i> .	104
FIGURA 21 - CONFIGURAÇÃO DE USO DA EDIFICAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE AR.....	104
FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO DE ESPAÇOS .....	107
FIGURA 23 - CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS DOS ESPAÇOS INTERNOS .....	107
FIGURA 24 – MODELO ANALÍTICO DE ENERGIA.....	110
FIGURA 25 - EXEMPLO DE BARRA DE INTERAÇÃO PARA ALTERAR OS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO MODELO.....	111



FIGURA 26 - CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA A UTILIZAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTÁICOS NA COBERTURA DA EDIFICAÇÃO .....	112
FIGURA 27 - RAIZ PARA A ESCOLHA DOS MATERIAIS EM TALLY .....	117
FIGURA 28 - SELEÇÃO DE MATERIAL E CARACTERÍSTICAS DESTE NO BANCO DE DADOS .....	118
FIGURA 29 - DEFINIÇÕES DE TEMPO DE VIDA ÚTIL DO MATERIAL E ELEMENTOS COMPLEMENTARES .....	119
FIGURA 30 - ABA DE SELEÇÃO PARA ITENS COMPLEMENTARES DA ACV EM TALLY .....	120

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPOSIÇÃO DA ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS POR SEGMENTO NO BRASIL...	24
GRÁFICO 2 - A DENSIDADE DA MADEIRA ESTRUTURAL USADA PARA ATINGIR UMA DETERMINADA ALTURA DE CONSTRUÇÃO PARA VÁRIOS SISTEMAS ESTRUTURAIS .....	41
GRÁFICO 3 - ALTURA DAS EDIFICAÇÕES COMPARADAS .....	65
GRÁFICO 4 - MATERIAIS COMPARADOS ENTRE OS ESTUDOS .....	66
GRÁFICO 5 - FASES DO CICLO DE VIDA AVALIADOS PELOS ESTUDOS .....	72
GRÁFICO 6 - MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA.....	121
GRÁFICO 7 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> ) POR ETAPA DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO .....	123
GRÁFICO 8 - ENERGIA PRIMÁRIA (MJ/m <sup>2</sup> ) POR ETAPA DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO .	124
GRÁFICO 9 - ENERGIA RENOVÁVEL E NÃO RENOVÁVEL POR METRO QUADRADO (MJ/ m <sup>2</sup> ) EM CADA ETAPA DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO .....	124
GRÁFICO 10 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO <sub>2</sub> eq.) E ENERGIA NÃO RENOVÁVEL (MJ) POR MATERIAL DO MODELO EM CLT .....	129
GRÁFICO 11 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO <sub>2</sub> eq.) E ENERGIA NÃO RENOVÁVEL (MJ) POR MATERIAL DO MODELO EM CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO .....	130
GRÁFICO 12 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO <sub>2</sub> eq.) E ENERGIA NÃO RENOVÁVEL (MJ) POR MATERIAL DO MODELO EM BLOCO DE CONCRETO .....	132
GRÁFICO 13 -COMPARATIVO ENTRE OS IMPACTOS DE CADA MODELO .....	133

## **LISTA DE QUADROS**

QUADRO 1 – EDIFÍCIOS EM CLT PELO MUNDO: PANORAMA DAS PRINCIPAIS OBRAS .....	36
QUADRO 2 – ESTÁGIOS DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE UMA EDIFICAÇÃO .....	60
QUADRO 3 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA .....	77
QUADRO 4 – MAPA MENTAL DA PESQUISA.....	78

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – VALORES DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA PARA PAINÉIS DE CLT .....	53
TABELA 2 – COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ENTRE AS EDIFICAÇÕES STADTHAUS, VIA CENNI E ORIGINE .....	55
TABELA 3 – COMPARAÇÃO DOS PAINÉIS UTILIZADOS PARA AS EDIFICAÇÕES STADTHAUS, VIA CENNI E ORIGINE .....	57
TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DOS ESTUDOS DE ACV ANALISADOS DE EDIFICAÇÕES EM CLT .....	68
TABELA 5 – QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O MODELO EM CLT .....	92
TABELA 6 – QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O MODELO EM CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO .....	94
TABELA 7 – QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O MODELO EM BLOCO DE CONCRETO .....	96
TABELA 8 – COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS UTILIZADOS NOS TRÊS MODELOS (CLT, CONCRETO E BLOCO CERÂMICO E BLOCO DE CONCRETO ESTRUTURAL) .....	98
TABELA 9 – PROPRIEDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS.....	103
TABELA 10 - PADRÃO DE OCUPAÇÃO DOS AMBIENTES.....	105
TABELA 11 - CONSUMO MÉDIO POR EQUIPAMENTO .....	106
TABELA 12 – CONDIÇÃO DE ACLIMATAÇÃO DOS AMBIENTES RESIDENCIAIS.....	106
TABELA 13 - DADOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE (FÁBRICA – CANTEIRO DE OBRAS)...	108
TABELA 14 – VIDA ÚTIL DE PROJETO (VUP) DOS COMPONENTES DA EDIFICAÇÃO .....	109
TABELA 15 - CONSUMO ENERGÉTICO PARA OS DIFERENTES MODELOS .....	113



## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	- Avaliação de Ciclo de Vida
ACVC	- Avaliação de Ciclo de Vida de Custo
AEC	- Arquitetura, Engenharia e Construção
ASHRAE	- <i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BIM	- <i>Building Information Modelling</i>
CCA	- Arseniato de Cobre Cromatado
CCB	- Borato de Cobre Cromatado
CNA	- Confederação Nacional de Agricultura
CLT	- Cross-Laminated Timber
CO <sub>2</sub>	- Dióxido de Carbono
EQ.	- Equivalente
EPD	- <i>Environmental Product Declaration</i>
EPS	- Poliestireno Expandido
GJ	- Giga Joule
GLUELAM	- Madeira Laminada Colada
GWP	- <i>Global Warming Potential</i> ou Potencial de Aquecimento Global
HIS	- Habitação de Interesse Social
HVAC	- <i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>
IBA	- Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	- <i>International Organization for Standardization</i>
KG	- Kilograma
KWH	- Kilo Watt hora
KWH/M <sup>2</sup> /ANO	- Kilo Watt hora/ metro quadrado/ ano
LCA	- <i>Life Cycle Assessment</i>
LCC	- <i>Life Cycle Cost</i>
LVL	- <i>Laminated Veneer Lumber</i>
MJ	- Mega Joule
N	- Nitrogênio
PBE Edifica	- Programa brasileiro de etiquetagem nas edificações
PBQP-H	- Programa brasileiro de qualidade e produtividade do habitat

PROCEL	- Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PSL	- <i>Parallel Strand Lumber</i>
PSQ	- Programas Setoriais de Qualidade
PPGECC	- Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil
SO <sub>2</sub>	- Dióxido de Enxofre
TIMO	- <i>Timber Investment Management Organizations</i>
UFPR	- Universidade Federal do Paraná
VUP	- Vida Útil de Projeto
WWR	- <i>Window Wall Ratio</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO .....	20
1.2	PRESSUPOSTOS.....	20
1.3	OBJETIVO .....	20
1.4	DELIMITAÇÃO .....	21
1.5	JUSTIFICATIVA.....	21
1.5.1	Justificativa ambiental .....	21
1.5.2	Justificativa social e econômica.....	23
1.5.3	Justificativa tecnológica.....	27
1.6	CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA.....	27
1.7	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	28
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	30
2.1	O QUE É CLT (CROSS-LAMINATED TIMBER).....	30
2.4	HISTÓRIA DO CLT – PANORAMA GERAL, HISTÓRIA.....	33
2.3	MATÉRIA PRIMA, CAPACIDADE ESTRUTURAL E NORMATIZAÇÃO .....	38
2.4	MODO DE CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM CLT .....	41
2.4.1	Estrutura e construção.....	41
2.4.2	Conexões.....	43
2.4.3	Revestimentos .....	44
2.4.4	Concepção de projetos em CLT.....	45
2.4.5	Custos do CLT .....	47
2.5	O CLT NO BRASIL .....	49
2.6	LEGISLAÇÃO DE MADEIRA MASSIVA .....	50
2.7	ESPECIFICIDADES DO PROJETO EM CLT- ESTUDO DE CASO DE TRÊS EDIFICAÇÕES EM CLT .....	52
2.8	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA .....	58
2.8.1	Avaliação de Ciclo de Vida e BIM.....	62
2.9	ESTADO DA ARTE: PESQUISA DE ACV DE EDIFÍCIO EM CLT .....	64

2.9.1	Critérios ambientais .....	67
2.9.2	ACV: base de dados, fases avaliadas e resultados .....	69
3	ESTRATÉGIA DE PESQUISA.....	76
3.1	DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIA DE PESQUISA .....	76
3.1.1	Justificativa da escolha a partir do objetivo .....	77
3.1.2	Mapa mental de execução da pesquisa .....	78
3.1.3	Validade .....	78
3.1.3.1	Validade do constructo .....	79
3.1.3.2	Validade interna .....	79
3.1.3.3	Validade externa .....	79
3.1.3.4	Confiabilidade.....	80
3.4	UNIDADE DE ANÁLISE .....	80
3.3	PROTÓCOLO DE COLETA DE DADOS .....	80
3.3.1	Método de análise de dados .....	82
4	ESTUDO DE CASO .....	83
4.1	EDIFICAÇÃO UTILIZADA PARA O ESTUDO DE CASO COMPARATIVO ...	83
4.4	ELABORAÇÃO DO MODELO .....	85
4.5	MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO EM CLT .....	87
4.3.1	Edificação projetada em CLT .....	88
4.3.2	Uso de componentes BIM para elaboração do modelo e quantitativos .....	91
4.3.3	Modelagem da edificação em concreto armado e alvenaria de bloco cerâmico .....	93
4.3.4	Modelagem da edificação em bloco de concreto .....	95
4.4	DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS .....	97
4.5	LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO MODELO .....	98
4.6	DEFINIÇÃO DE SOFTWARES E BASE DE DADOS PARA ACV .....	100
4.7	COLETA DE DADOS.....	101
4.7.1.	Características físicas e térmicas dos materiais .....	102
4.7.2	Uso e ocupação dos ambientes .....	105
4.7.3	Distâncias entre a fábrica e o canteiro de obras .....	107
4.7.4	Manutenção e troca de materiais ao longo do ciclo de vida .....	108



5	AVALIAÇÃO DO CONSUMO OPERACIONAL DA EDIFICAÇÃO .....	110
5.1	ENVIO DO MODELO PARA A NUVEM E PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO.....	110
5.2	CONSUMO TERMO ENERGÉTICO DA EDIFICAÇÃO DURANTE A FASE OPERACIONAL .....	113
6	AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA .....	116
6.1	RESULTADOS DA ACV EM TALLY .....	122
6.1.1	Pré-operacional (A1-A4) .....	125
6.1.2	Operacional (B2-B6).....	126
6.1.3	Pós-operacional (C2-C4 e D).....	126
6.2	RESULTADOS TOTAIS DA ACV EM TALLY POR MEIO DA ANÁLISE DE CADA MATERIAL .....	128
6.2.1	Modelo em CLT.....	128
6.2.1	Modelo em concreto armado e bloco cerâmico .....	130
6.2.3.	Modelo em bloco de concreto.....	131
6.2.4	Comparação entre os modelos .....	132
7	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES FINAIS .....	135
7.1	RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	136
7.2	PONTOS A SEREM CONSIDERADOS DURANTE A COLETA DE DADOS ..	138
7.3	LIMITAÇÕES ENCONTRADAS NOS SOFTWARES E PLUGINS UTILIZADOS.....	140
7.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	141
	REFERÊNCIAS .....	143
	ANEXOS 1 – RESULTADOS SIMULAÇÃO ACV- TALLY (CLT) .....	153
	ANEXO 2 – RESULTADOS SIMULAÇÃO ACV- TALLY (CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO).....	169
	ANEXO 3 – RESULTADOS SIMULAÇÃO ACV- TALLY (BLOCO DE CONCRETO) .....	182

## 1 INTRODUÇÃO

Na arquitetura tradicional e vernacular, materiais locais e de reduzido impacto ambiental são utilizados com frequência, contudo, materiais globais e de maior tecnologia, tais como cimento, alumínio, concreto e PVC são mais recorrentes nas obras civis hoje (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009). A partir da utilização pela construção civil de materiais provenientes de extração mineral e fóssil, os quais também passam por processos de industrialização e longos trajetos até os canteiros de obras, é possível constatar que os impactos causados pela construção civil passam a tomar outras proporções, uma vez que o setor é um dos maiores consumidores de energia, assim como um dos maiores emissores de gases causadores do efeito estufa. Estima-se que cerca de 40% da energia gerada e 30% do dióxido de carbono emitido no mundo são provenientes da construção civil (NEW ZEALAND GREEN BUILDING COUNCIL, 2016; WGBC, 2016).

Ainda é possível observar que para que este cenário seja alterado, é necessário que toda a energia gasta pelo setor seja reduzida. Neste sentido, os materiais que compõe o invólucro construtivo são, portanto, uma influência direta nos impactos ambientais gerados pela edificação. Em primeira instância devido a sua retirada da natureza e processo de fabricação, já durante o uso por conta de seu desempenho térmico, acústico, lumínico e controle dos gastos operacionais da edificação e mais tarde por conta de sua destinação final após o fim do ciclo de vida do edifício.

Neste contexto, a investigação de materiais para a construção civil que tenham tecnologia embutida, mas que gerem menores impactos ao meio ambiente, é uma constante busca do setor. Como alternativa ao uso de materiais minerais e fósseis está a madeira, um material renovável, capaz de armazenar dióxido de carbono em seu processo de crescimento. Com isso, seu uso pode também ser favorável à redução dos impactos causados pela construção civil.

Assim, aliar a escolha de materiais de baixo impacto ambiental ao uso de tecnologia aplicada à construção civil, a fim de atender à crescente demanda do mercado por alternativas adequadas às necessidades espaciais da construção está entre as prerrogativas de construção de edificações mais sustentáveis.

A forma com que a madeira pode contribuir para a redução do impacto causado pela construção civil está no modo como ela é capaz de crescer e se renovar na natureza. Desta maneira, a utilização da madeira como matéria prima para construção de edificações verticais pode reduzir os impactos gerados ao longo de sua vida útil, já que durante o processo de

crescimento, a árvore armazena o dióxido de carbono, sequestrando-o ao longo de toda a vida útil da madeira e retornando a natureza após o seu processo de descarte, sem que sejam necessários agentes externos para este processo (RAMAGE et al., 2017). Apesar desta vantagem, é ainda importante que o material apresente qualidade, durabilidade e flexibilidade para os usos aos quais se destina.

Neste sentido, surge o CLT, um material e ao mesmo tempo uma técnica construtiva capaz de unir o uso de madeira por meio de alta tecnologia aplicada. O CLT – Cross-laminated Timber – ou em tradução livre para o português Madeira Laminada Cruzada Colada, é um material capaz de apresentar menor impacto ambiental em seu ciclo de vida se comparado a outros materiais e ao mesmo tempo atender as demandas de edificações verticais, tais como a necessidade de rápida montagem, flexibilidade de uso, alta resistência estrutural, estética, dentre outras.

O CLT consiste em lâminas de madeira coladas em camadas perpendiculares entre si, geralmente em número ímpar, constituindo painéis autoportantes de madeira massiva, podendo ser caracterizado como uma técnica construtiva onde a estrutura e a vedação são constituídas por elementos únicos. A técnica de fabricação do CLT consiste na colagem e prensagem de tábuas de madeira, sendo que estas podem apresentar imperfeições e ter dimensões reduzidas, uma vez que ao juntar as tabuas paralelas a fibra, criar camadas e colar essas camadas perpendicularmente a outra camada de tabuas, se gera um produto maciço e que tem maior resistência do que se estas mesmas peças de madeira fossem utilizadas individualmente.

Outro importante ponto é a versatilidade que esta técnica construtiva em madeira permite. É possível conceber edificações de mais de oito pavimentos utilizando apenas CLT como estrutura e vedação. Ramage et al. (2017) ressalta que construções contemporâneas de edifícios em altura em madeira, em sua totalidade ou em partes, sugerem um crescimento do interesse no potencial de construções com madeira em uma escala não antes atingível com tal produto. Neste sentido, hoje já se tem documentado edificações com até 18 pavimentos desenvolvidas com estrutura exclusiva em madeira, por meio da técnica mistas que utilizam painéis de CLT como um dos componentes para vedação e estrutura, as chamadas edificações híbridas em madeira massiva.

No entanto, a tecnologia aplicada a técnicas construtivas de madeira massiva ainda é uma realidade pouco explorada em países como o Brasil. Onde mesmo que haja grande potencial de produção madeireira, ainda são enfrentadas dificuldades relacionadas à importação de tecnologia e legislação em relação ao uso da madeira massiva.

Portanto, o CLT pode ser considerado um material da construção civil, ao mesmo tempo que configura uma técnica construtiva própria para montagem de edificações. O seu potencial dentro da construção civil e dentro do contexto brasileiro é vasto e ainda pouco explorado, portanto, esta pesquisa busca fomentar a construção de conhecimento acerca do uso do CLT na construção civil segundo parâmetros ambientais.

## 1.1 PROBLEMATIZAÇÃO

Ainda são pouco exploradas no Brasil técnicas construtivas que transformem a madeira em um produto tecnológico para a construção civil por meio de um processo industrializado, como o CLT. Para tanto é necessário que esta técnica construtiva seja explorada do ponto de vista de seu impacto ambiental, para que sua investigação durante o processo projetual possa ser justificada e fomentada a partir das premissas da sustentabilidade no ambiente construído.

Desta forma, esta pesquisa está interessada em responder ao seguinte questionamento: Qual é o impacto ambiental relacionado a emissão de dióxido de carbono e gasto energético ao longo do ciclo de vida de edifícios em CLT quando comparado com outras técnicas construtivas comumente utilizadas na construção civil nacional?

## 1.2 PRESSUPOSTOS

Esta pesquisa parte dos seguintes pressupostos:

- O processo de sequestro de dióxido de carbono promovida pela fixação do carbono em usos duráveis na madeira – e não combustível – é uma estratégia de sustentabilidade;
- A madeira maciça, como é o caso do CLT, tem massa térmica, capaz de criar inércia térmica e auxiliar na manutenção de temperatura interna da edificação. Também sua capacidade de controle de umidade e questões estéticas de exposição da madeira ao meio ambiente auxiliam no controle e percepção de temperatura interna do invólucro construído.

## 1.3 OBJETIVO



Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o ciclo de vida de uma edificação vertical em CLT em relação ao seu consumo energético e emissão de dióxido de carbono comparado às técnicas construtivas tradicionalmente utilizadas no Brasil.

Além deste objetivo, pretende-se, por meio da elaboração de um modelo virtual e simulação em softwares e plugins em BIM, avaliar se é possível que projetistas utilizem a ACV ainda durante o projeto para avaliar e comparar os impactos de diferentes materiais aplicados a um mesmo edifício, por meio de ferramentas integradas à BIM.

#### 1.4 DELIMITAÇÃO

A pesquisa contempla um estudo do impacto ambiental do CLT aplicado às edificações de oito pavimentos, investigando seu uso, limitações e vantagens da técnica construtiva. Não serão exploradas a capacidade da indústria da construção civil em absorver a técnica em seus processos produtivos e a sua viabilidade econômica.

Este estudo não deve contemplar a fase da Avaliação de Ciclo de Vida conhecida como A4- Construção ou Montagem da Edificação, uma vez que não há dados suficientes com relação a esta fase a edificações em CLT no Brasil.

Limitações quanto a modelagem e dimensionamento estrutural da edificação em CLT podem ser evidenciadas, devido ao reduzido número de informações a respeito deste tema e devido ao baixo número de edificações construídas utilizando esta técnica construtiva, não havendo dados suficientes de painéis em CLT fabricados com madeiras provenientes de florestas plantadas brasileiras, portanto, sendo necessário trazer informações de madeiras utilizadas em outros países para a elaboração deste estudo.

#### 1.5 JUSTIFICATIVA

##### 1.5.1 Justificativa ambiental

Ao longo do século XX e início do século XXI, as áreas urbanas ao redor do mundo foram moldadas por arranha-céus construídos em aço e concreto. Conforme Larsson, Kaiser e Girhammar (2012), em 2006 a produção de cimento atinge o equivalente a 7,5 mil milhões de metros cúbicos produzidos por ano, o que significa mais de 1 metro cúbico de cimento por pessoa ao ano, tornando o concreto um dos materiais mais utilizados no mundo.

Apesar de sua produção em larga escala, foi apenas a partir do advento de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida dos materiais que o concreto começou a se destacar como um dos

materiais que mais contribuem para o aquecimento global. Assim, a indústria do cimento é uma das principais emissoras de dióxido de carbono devido à grande demanda do produto em todo o mundo.

O setor da construção civil é globalmente reconhecido como um importante consumidor de recursos naturais. O setor consome 32% dos recursos, sendo destes, 12% da água e 40% da energia, conforme dados de Yeheyis et al. (2012). Ibn-Mohammed et al. (2013) ainda complementam, afirmando que o setor é responsável pelo consumo de 30% das matérias primas, pela geração de cerca de 25% de descarte e 33% da emissão de gases do efeito estufa em todo o mundo. Portanto, reduzir o consumo de recursos, a emissão de gases do efeito estufa e propor uma arquitetura que utilize materiais renováveis, como é o caso do uso da madeira, são diretrizes importantes para a promoção de construções mais sustentáveis.

Ainda com relação ao impacto gerado pelos materiais de construção, de acordo com os números extraído da base de dados alemã *Gabi*, a quantidade de energia necessária para produzir uma tonelada de tijolos é quatro vezes superior à necessária para produzir uma tonelada de painéis de madeira, já o cimento é 5 vezes mais impactante, o vidro 6, o aço 24 e o alumínio 126 (GABI, 2018). Junte-se a isso ao fato de que as projeções continuam a apontar que a população deve continuar a crescer nas próximas décadas, o que gera uma demanda crescente por habitação.

Outro fator importante é a migração populacional do campo para a cidade e a redução do tamanho médio das famílias, o que gera a necessidade de mais unidades habitacionais e consequentemente na continuidade de crescimento do setor da construção civil em todo o planeta. De acordo com os dados da Un-Habitat (2008) na declaração de Quito sobre cidades sustentáveis e assentamentos humanos para todos, estima-se que a população deve dobrar de tamanho ainda nas próximas décadas. A declaração ainda estima até 2050 cerca de 70% da população mundial esteja vivendo em cidades, fazendo a urbanização um dos maiores desafios do século XXI.

Ainda que, conforme dados do WWF Report (2018), por meio das mudanças tecnológicas e práticas de manejo do solo, a capacidade de regeneração da Terra subiu 27% nos últimos 50 anos, neste mesmo período, o consumo humano cresceu por volta de 190%, o que torna o planeta Terra incapaz de regenerar todo o impacto causado pelo ser humano. Consequentemente, a redução do consumo energético e dos impactos climáticos causados pelas edificações é visto com uma medida crítica a ser tomada pelo IPCC (2014).

Assim, é urgente a necessidade de repensar os padrões habitacionais, o modo e os materiais que são utilizados para a construção civil. Neste sentido, o uso da madeira como

material de construção tem a capacidade de gerar economia de energia ao longo de todo o seu processo de produção e de uso, bem como em sua fase final boa parte de seus nutrientes são devolvidos a natureza, tornando a madeira um material renovável e sustentável, desta maneira, são diversas as vantagens do uso da madeira pelo setor da construção civil, tais como a reduzida emissão de gases no processo fabricação de produtos a base de madeira (IZZU et al., 2018), também justificada pelo sequestro de carbono durante o crescimento das árvores (CABRERO; IRAOLA; YURRITA, 2018; RAMAGE et al., 2017).

Destaque-se que o processo de fabricação de peças em madeira consiste em encurtar os processos de montagem e execução no canteiro de obras (RAMAGE et al., 2017) e também deve ser levado em consideração o reduzido peso de estruturas em madeira se comparadas ao concreto, cerca de 50% menor (SKIDMORE, 2018; WOOD-WORKS, 2015), sendo sua relação entre peso e resistência alta e, por conta disso, reduzindo a propensão de problemas em áreas com atividade sísmica do solo (ZHANG; POPOVSKI; TANNERT, 2018).

Ramage et al. (2017) ainda complementa que a madeira é um material usado pela construção civil que apresenta características sustentáveis, justificado pelo fato de que uma floresta de manejo, se bem articulada, tem a capacidade de produzir matéria prima de qualidade em determinados períodos de tempo, ao mesmo tempo em que reduz os poluentes do ar por meio do sequestro de carbono.

Portanto, a madeira, como material da natureza, reciclável, renovável e capaz de armazenar dióxido de carbono, pode ser um fator importante no combate às emissões nocivas ao planeta. A utilização de madeira, se levando em consideração o sequestro de carbono, quando comparada a outros materiais de construção, economiza, em média, 0,8 toneladas de CO<sub>2</sub> por metro cúbico, ou seja, uma construção feita de madeira pode alcançar uma pegada de carbono negativa, possuindo a menor energia incorporada se comparada com os principais materiais de construção tradicionais, conforme dados da base *Gabi* (2018).

Assim, a mitigação da emissão de dióxido de carbono no planeta está na base das recentes políticas ambientais ao nível mundial, desta forma, é importante que sejam estudadas maneiras de trabalhar a madeira e promover seu uso como material permanente para a construção civil.

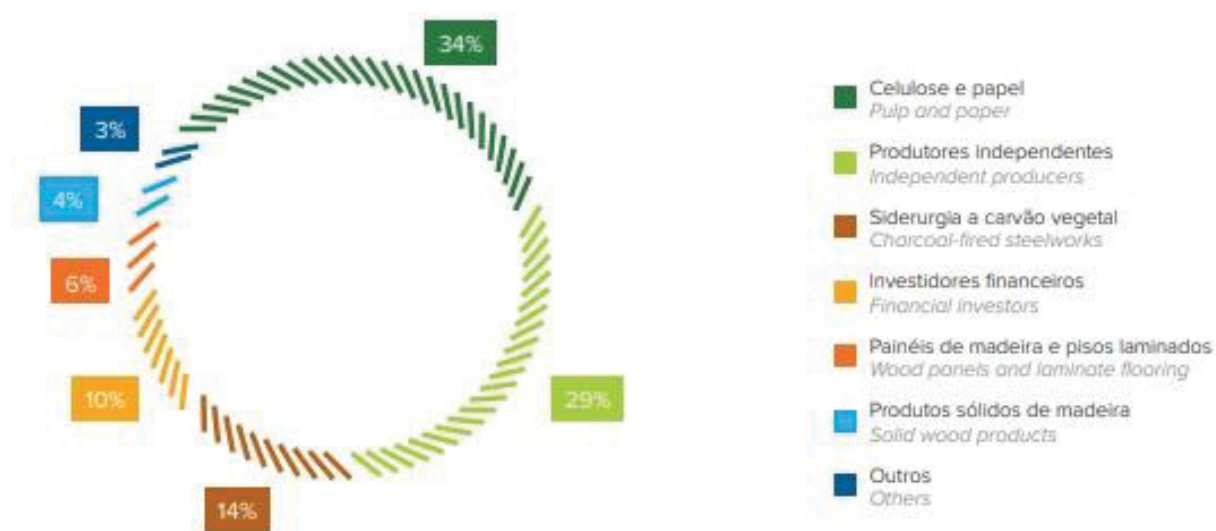
#### 1.5.2 Justificativa social e econômica

Edifícios em madeira podem ser uma oportunidade para conectar a comunidade urbana a recursos provenientes do meio rural, por meio da criação de edifícios verdes e auxiliando na

restauração florestal (DOVETAIL PARTNERS, 2016). Assim, no meio rural, as atividades ligadas à produção e à comercialização de madeira apresentam uma importante fatia do PIB nacional, sendo que, segundo dados do relatório anual do IBA (2017), a área de reflorestamento atingiu 7,84 milhões de hectares, sendo o setor brasileiro de árvores plantadas responsável por 91% de toda a madeira produzida para fins industriais e 6,2% do PIB industrial no país.

Acrescente-se o fato de que é um dos que segmentos com maior potencial de contribuição para a construção de uma economia verde. Apesar disso, apenas uma pequena parcela da produção madeireira é destinada ao setor da construção civil, conforme pode ser observado pelo Gráfico 01, ainda que esse seja capaz de agregar maior valor aos produtos que tem a madeira como matéria prima.

GRÁFICO 1 - COMPOSIÇÃO DA ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS POR SEGMENTO NO BRASIL



FONTE: Ibá e Poyry (2016).

Ainda é possível destacar que o segmento de florestas plantadas apresenta elevado impacto social e econômico para o Brasil. No entanto, conforme destaca Moreira, Simoni e Oliveira (2017), no cenário nacional ainda é pouco explorado o potencial do setor madeireiro se considerarmos o potencial produtivo e disponibilidade de terras para esta finalidade ao longo da extensão do território nacional. Isto sem que haja prejuízo nas áreas produtivas ou ainda nas áreas de preservação, o que poderia representar um investimento atrativo tanto para investidores como para a conservação das florestas.

Segundo dados do IBA (2017) as florestas plantadas representam menos de 1% de todo o território nacional e são responsáveis por mais de 90% de toda a madeira utilizada para fins produtivos, além de contribuírem de forma inegável para a conservação da biodiversidade,

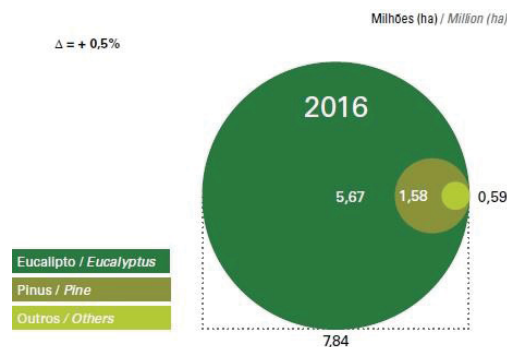
preservação do solo, regulação dos recursos hídricos, recuperação de áreas degradadas e geração de energia renovável.

Moreira, Simoni e Oliveira (2017) ainda destaca que a atividade apresenta alto potencial de expansão, com geração de renda e emprego, principalmente ao longo da sua cadeia produtiva de transformação da madeira, o que poderia auxiliar na consolidação da produção de material voltado para a construção civil.

Os dados de 2016 de um levantamento feito pelo CNA (Confederação Nacional de Agricultura) apontam que as florestas plantadas no Brasil são compostas, em sua grande maioria, por árvores do gênero *Pinus spp.* e árvores do gênero *Eucalyptus spp.*, conforme a mostra a Figura 01.

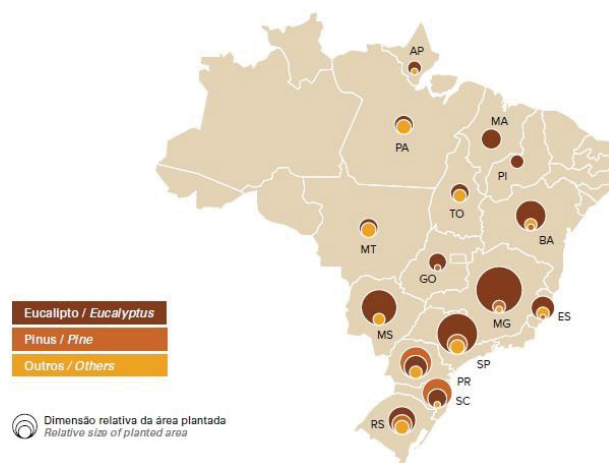
As principais características do *pínus spp* são sua resistência à baixas temperaturas e o plantio em terrenos rasos e pouco produtivos para a agricultura. A árvore pode chegar até 30 metros de altura e seu corte é destinado a fins industriais com idade que variam de 13 a 20 anos. Já o *Eucalyptus spp* possui uma grande variedade de espécies, contando com mais de 700 espécies registradas e de grande adaptabilidade climática. Seus usos são os mais diversos e o seu crescimento é muito rápido, podendo atingir até 35 metros. Seu corte se dá a partir dos 5 anos de idade e depende da finalidade para que a árvore é destinada.

FIGURA 1 - ÁREA DE ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL



FONTE: Ibá e Poyry (2017).

FIGURA 2 - ÁRVORES PLANTADAS NO BRASIL DISTRIBUÍDAS POR ESTADO E POR GÊNERO



FONTE: Ibá e Poyry (2017).

Conforme os dados apresentados pelo Gráfico 01, infere-se que grande parte dos produtos produzidos pela indústria da madeira no Brasil são de baixo valor agregado, tal como a siderurgia e o carvão vegetal. Outra parte, ainda, não são rastreáveis, por ser vendida por produtores independentes no caso do papel, onde é estimado o gasto de 213 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de água para a produção de 1 metro cúbico de papel, sendo a madeira que dá origem ao papel proveniente de florestas subtropicais de *Eucalyptus* no Brasil (VAN OEL; HOEKSTRA, 2010), gerando um alto gasto energético para o processo de fabricação, sem que isso se reflita em uma valorização do produto final.

Desta maneira, este trabalho pretende trazer uma alternativa de uso da madeira a fim de permitir que ela seja utilizada na fabricação de produtos para a construção civil, o que acaba por aumentar o valor agregado da madeira, a tecnologia embutida para sua produção e a redução do gasto energético para a fabricação de materiais da construção civil, refletindo também na redução do consumo energético e emissão de gases do efeito estufa em toda a cadeia produtiva do setor.

Há ainda o desejo de que o uso de madeira no setor da construção civil cause o aumento do valor deste produto, incremente o manejo adequado das florestas plantadas e faça com que a área destinada ao plantio de árvores cresça em relação a outros produtos agroflorestais. Ramage et al. (2017) acredita que o aumento do uso da madeira pela construção pode motivar o reflorestamento e o manejo adequado das florestas.

### 1.5.3 Justificativa tecnológica

Berge (2009) afirma que a indústria da construção civil é, depois da indústria alimentícia, a maior consumidora de matéria prima no mundo. Portanto, evidenciar produtos que possam reduzir os gastos energéticos e por fim os impactos ambientais gerados pelo setor, é uma importante contribuição dos profissionais da área para o meio ambiente e para a manutenção dos recursos para as próximas gerações.

Conforme Ramage et al. (2017), a madeira usada para construção ou para produtos de engenharia estão entre os produtos que tem maior valor entre aqueles advindos das árvores. Já para Jacek; Frederick; Rukunddin (2005) o aumento da demanda de madeira por parte da construção civil pode ser visto, pelo menos em parte, por uma gestão mais eficiente da floresta existente e do processamento da madeira.

Tem-se ainda que novas tecnologias, como o CLT e a Madeira Laminada Colada, diversificam o uso da madeira e permitem que ela possa ser utilizada de maneira mais flexível para atender as demandas de mercado por edificações verticais. Para Bernheimer (2015) a madeira, que está entre os materiais mais antigos usados para a construção, tem se tornado uma das mais novas e inovadoras tecnologias construtivas, graças ao uso de tecnologias aplicadas à madeira maciça, como o CLT, a Madeira Laminada Colada e o LVL (Laminated Veneer Lumber).

## 1.6 CONTEXTUALIZAÇÃO NO PROGRAMA

O Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná tem como objetivo principal a ampliação e o aprofundamento de conhecimentos nas áreas de Engenharia Civil para atendimento à demanda existente (PPGECC, 2012). Este trabalho encontra-se na linha de pesquisa de sustentabilidade no ambiente construído e busca explorar cenários do impacto ambiental causado pelo uso do CLT na construção civil brasileira. Dentro da linha de pesquisa da Avaliação de Ciclo de Vida e do uso da madeira na construção civil diversos trabalhos já formam desenvolvidos, dentre eles, aqueles de maior relação com o presente trabalho e sua breve descrição estão:

Hilgenberg Neto (2003) comparou o processo construtivo em alvenaria convencional e em madeira para habitações de interesse social. Com isso determinou a viabilidade técnica e econômica de se adotar a madeira de reflorestamento disponível no Paraná em um processo construtivo.



Castro (2008) a partir da análise da realidade do Chile e sua comparação com a realidade nacional, definiu diretrizes que promovam o incremento do uso da madeira em construções habitacionais no Brasil.

Marcos (2009) analisou a emissão de dióxido de carbono em dois tipos de habitação de interesse social, uma construída nos métodos convencionais – paredes de alvenaria, cimento e argamassa – e outra utilizando painéis de madeira por meio do uso de um sistema CAD-BIM.

Monich (2012) analisou a contribuição do processo de manufatura de uma habitação de interesse social pré-fabricada em *wood frame* e teve como principal objetivo dimensionar a energia e o carbono embutidos nos materiais que a compõem.

Oliveira (2016) ainda determinou a energia embutida (EE) e o gás carbônico embutido na extração e produção dos componentes de madeira que compõe o sistema construtivo *wood frame*, ela ainda comparou dois padrões construtivos em *wood frame* com base na EE e CO<sub>2</sub> embutido nos materiais utilizados.

Já Azevedo (2019) simula por meio do uso de ferramentas em BIM o consumo termo energético, a energia embutida e a emissão de dióxido de carbono de uma habitação de interesse social em *wood frame* e conclui que o uso de BIM auxilia para a análise e estimativa dos impactos por uma edificação em *wood frame*, sendo assim, uma ferramenta de auxílio para profissionais ao longo de seu processo projetual.

Neste contexto, esta pesquisa está inserida dentro da temática da Avaliação de Ciclo de Vida da edificação e de edificações em madeiras por meio do uso de BIM, no entanto, aquilo que esta pesquisa apresenta de inédito dentro do programa é uso de uma técnica construtiva em madeira massiva, o CLT, aplicado a edificações verticais.

## 1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da dissertação é apresentada de maneira a acompanhar as etapas desenvolvidas durante o trabalho. Neste sentido a composição deste trabalho está subdividida nos seguintes capítulos:

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO: apresentação do tema, problema a ser estudado, bem como o objetivo desta pesquisa, justificativa, contextualização da pesquisa dentro do programa que está inserido e estrutura da dissertação.

CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA: verificação da literatura existente sobre o tema abordado, fundamentando a justificativa da pesquisa e auxiliando na caracterização do problema de pesquisa; descrição sobre os conceitos de ACV; descrição sobre



o que é CLT; análise de edificações em CLT; ACV aplicadas a edificações em CLT para definir o entrelaçamento das temáticas abordadas pela pesquisa.

CAPÍTULO 3 – ESTRATÉGIA DA PESQUISA: detalha a metodologia aplicada para responder ao problema de pesquisa e para alcançar o seu objetivo e escopo; critérios para a modelagem do edifício e criação de quadro de quantitativos e insumos; aplicação de ferramentas de ACV; critérios de avaliação e tratamento de dados.

CAPÍTULO 4 – ESTUDO DE CASO: descreve a escolha do modelo de edificação vertical utilizado para modelagem e simulação; detalha o processo projetual do modelo virtual para as técnicas construtivas analisadas; descreve o escopo do estudo.

CAPÍTULO 5 – AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TERMOENERGÉTICO: este capítulo analisa e compara o consumo energético gerado pelo edifício vertical utilizando diferentes materiais durante seus 50 anos de vida útil.

CAPÍTULO 6 – AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA: este capítulo analisa e compara o impacto ambiental gerado pelo edifício vertical utilizando diferentes materiais, por meio da Avaliação de Ciclo de Vida da edificação.

CAPÍTULO 7 – DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS: comparação dos resultados obtidos e relação com outros estudos similares; discussão e conclusões a respeito do tema; limitações da pesquisa; sugestões de temáticas para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo é destinado a revisão e análise da literatura acerca do CLT, com sua contextualização, história, modo de uso e aplicações à edificações verticais, bem como uma breve contextualização sobre ACV e sua aplicação a edificações elaboradas com madeira massiva, mais especificamente abordando edificações construídas em CLT, expostos na literatura e periódicos recentes consolidados sobre o tema proposto.

### 2.1 O QUE É CLT (CROSS-LAMINATED TIMBER)

Cross-Laminated Timber ou CLT é conhecido com um tipo de produto de madeira engenheirada, e é um exemplo de material usado para construção massiva de madeira, pois passa por um processo de industrialização durante sua fabricação (HARRIS, 2015). Os produtos advindos de técnicas de madeira engenheirada são utilizados em substituição a materiais de construção mais comuns, incluindo concreto e aço, atendendo a demandas de edificações.

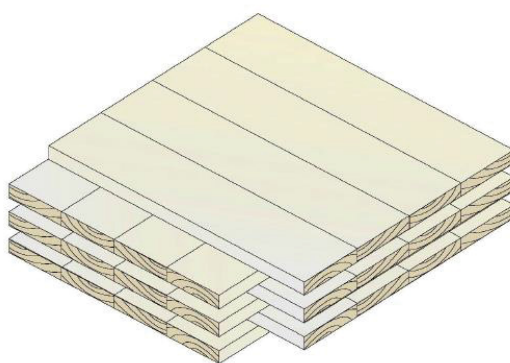
O CLT consiste em um painel massivo de madeira engenheirada de alta performance (STÜRZENBECHER; HOFSTETTER; EBERHARDSTEINER 2010), ou ainda em uma técnica que utiliza lâminas ou tábuas de madeira em camadas perpendiculares entre si, unindo-as por meio de uma cola ou adesivo e sob um processo de prensagem, sendo que as fibras estão orientadas nas camadas de modo ortogonal em relação a camada anterior.

Usualmente o número de camadas que formam o CLT é ímpar, normalmente 3, 5 ou 7 camadas e em alguns modelos de fabricação podendo chegar a 8 camadas de tabuas em camadas perpendiculares entre si, por conta disso, as camadas que estão visíveis têm a mesma orientação de fibra em ambos os lados do painel. Os painéis de CLT são conhecidos por sua performance estrutural, rigidez e força e devido a sua aplicação às edificações consistir em painéis autoportantes que podem ser utilizados simultaneamente como estrutura e vedação, ou ainda como lajes (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018).

A orientação perpendicular das camadas é o que caracteriza o material com sua rigidez, força e estabilidade se comparado com a madeira *in natura*. Vale ressaltar que por conta da orientação alternada das camadas, a influência de variações naturais, como nós e a característica anisotrópica da madeira (mudança das propriedades físicas de acordo com a direção em que a força é aplicada) é menor, conforme resgata Sikora, McPolin e Harte (2016). Tais autores ainda destacam que a madeira, quando empregada nesta técnica, usualmente tem maior capacidade estrutural do que esta mesma madeira se utilizada em seu estado natural ou serrada.

Por conta desta característica o CLT vem sendo empregado em edificações verticais com usos residenciais ou ainda comerciais. O CLT pode ser utilizado em construções de forma exclusiva, como estrutura e vedação, bem como em combinação com outros métodos construtivos como concreto e aço, principalmente em edificações em altura, caracterizando edificações híbridas.

FIGURA 3 – CONFIGURAÇÃO DAS CAMADAS LONGITUDINAIS E TRANSVERSAIS DA MADEIRA EM CLT



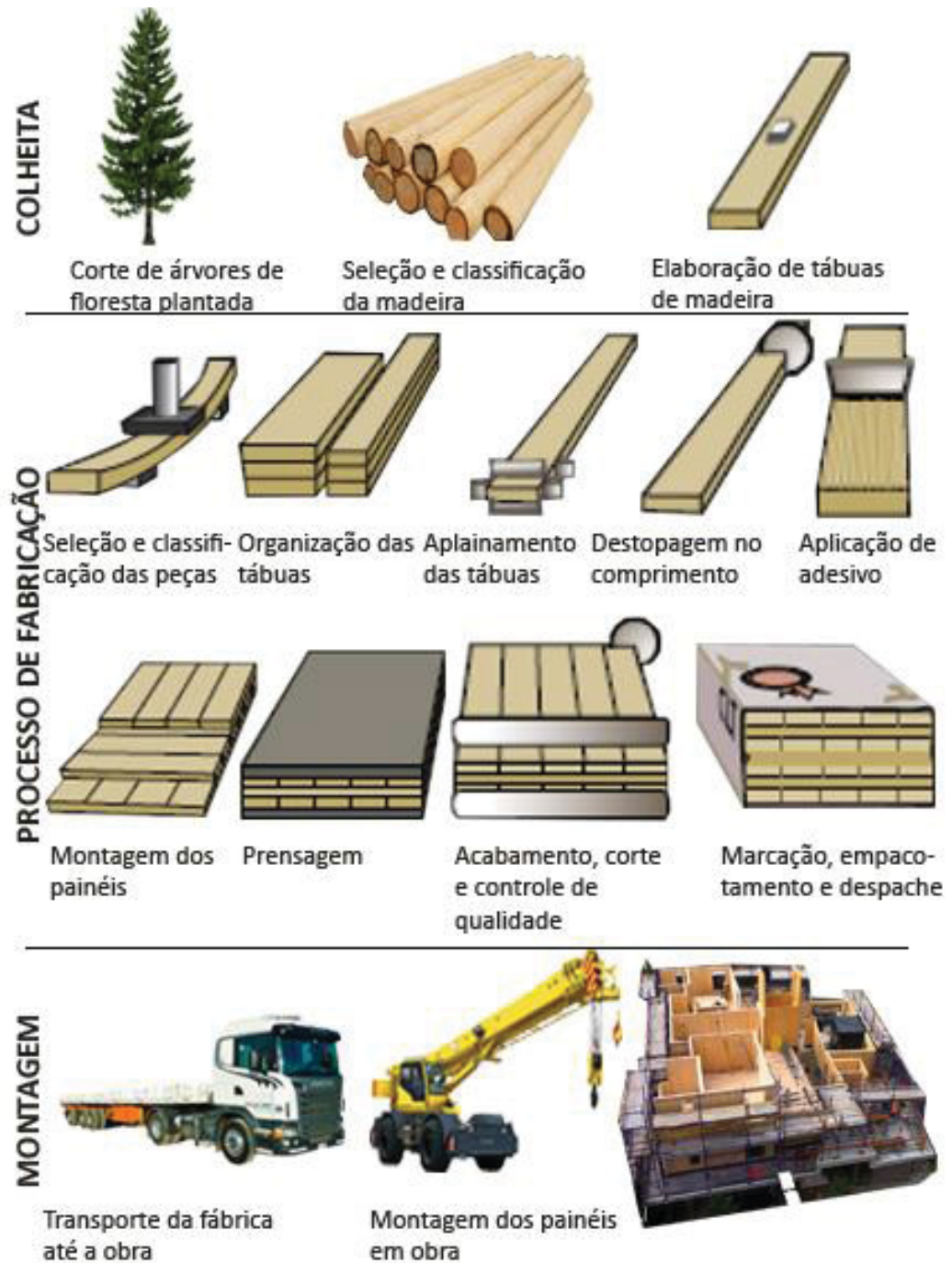
FONTE: Karacabeyli e Douglas (2013).

Após o corte das árvores provenientes de florestas plantadas e a posterior transformação em tábuas, o material passa por um processo de fabricação em indústrias especializadas, utilizando tecnologia computacional para que haja um processo de automação e para que os painéis sejam elaborados com uma baixa margem de erros. Entrando no processo de industrialização da madeira, seguem-se as seguintes etapas de produção: tratamento biológico, sessões de peças, classificação visual e usualmente classificação mecânica, agrupamento e aplainamento das camadas, aplicação de adesivo, agrupamento das camadas na forma de painéis e finalmente a prensagem, sendo esta última a fase crítica do processo, devido a necessidade de prensagem homogênea da peça (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013), conforme pode ser observado na Figura 04.

Após o processo de elaboração dos painéis, o produto passa para a fase de acabamentos, com o corte do produto em suas dimensões finais e com recorte de aberturas para esquadrias e para dutos previstos em projeto, seguido pelo aplainamento de superfícies aparentes e tratamento final. A dimensão dos painéis varia de acordo com o processo de manufatura e com a capacidade de transporte das peças, sendo que, no Brasil, a única empresa fabricante de CLT no mercado limita suas peças em 3,00 metros de altura por 12,00 metros de largura, com uma variação de espessura que vai de 57mm a 250mm (CROSSLAM, 2019), no

entanto, a medida de altura do painel variável entre 2,00 a 3,00m de altura, e a largura pode chegar até 18,00 metros por algumas indústrias, a depender, principalmente, da adequação para o transporte dos painéis. Após este processo de produção e acabamento, o produto é então embalado e segue, usualmente fazendo transporte por meio de caminhões até o canteiro de obras (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013).

FIGURA 4 – ESQUEMA DAS ETAPAS DE FABRICAÇÃO DOS PAINÉIS DE CLT



FONTE: Adaptado de Karacabeyli e Douglas (2013) *appud* Pereira (2014).

O processo de instalação dos painéis consiste em içá-los até seu local de montagem e fazer suas conexões por meio do uso de parafusos e junções metálicas. Neste sentido, o uso do CLT em obra agiliza o processo, uma vez que a montagem dentro do canteiro de obras pode ser feita com uma pequena equipe e com o auxílio de guias.

Assim, o CLT é considerado um produto utilizado para obras secas devido a sua velocidade de montagem e não geração de resíduos. Ainda a capacidade de execução dos espaços de aberturas e dutos é uma vantagem, trazendo celeridade a obras em CLT. De acordo com uma pesquisa feita no Reino Unido que investigou cem edificações construídas em CLT, em 58% dos casos, a velocidade de construção foi pontuada como o principal benefício do uso do material (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018).

Após esta etapa de montagem das peças, a obra pode seguir para o processo de acabamentos. Ainda que a economia de tempo seja resultado do processo de montagem dos painéis, o ganho de tempo também acontece por conta da celeridade na execução dos acabamentos da obra, devido a precisão das estruturas acabadas, estabilidade estrutural, trabalho simultâneo e facilidade de fixação da madeira.

É importante ressaltar que grande parte dos sistemas construtivos utilizados no Brasil, como alvenaria, alvenaria estrutura, concreto moldado *in loco*, são executados quase que em sua totalidade dentro do canteiro de obras, sem um processo de industrialização, o que acaba por gerar um aumento no desperdício de materiais, redução de produtividade e maior margem de erros, o que acarreta em redução da agilidade da obra.

## 2.4 HISTÓRIA DO CLT – PANORAMA GERAL, HISTÓRIA

A invenção do CLT data do início da década de 90 na Suíça, posteriormente introduzido na Alemanha e na Áustria ainda no início da mesma década, ganhando maior popularidade no começo dos anos 2000, devido ao esforço de pesquisas feitas na Áustria em parcerias da indústria com o meio acadêmico (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013). Assim, o uso da madeira massiva pela construção civil teve seu início por conta da produção excedente de madeira, e que a ela pudesse agregar maior valor. Com isso, o CLT, bem como outros materiais que beneficiam a madeira, tais como a Madeira Laminada Colada, surgiram com o intuito de agregar maior valor ao produto e explorar seu potencial tecnológico aplicado à construção civil.

Um importante fator, tem sido a percepção de que o CLT, assim como outros materiais, como a alvenaria e o concreto, é um material de construção pesado, o que faz dele um material

em potencial para o uso em edificações tanto unifamiliares como de múltiplos pavimentos, tornando-o competitivo em obras de médio porte e em edifícios em altura.

Este fator é determinante em países que tem a cultura de fazerem obras massivas, como é o caso do Brasil e de Portugal. Nestes países, é possível constatar a estigma de que construções secas não são boas para atividades de uso permanente, bem como que a madeira tem baixa durabilidade, resistência ao fogo e de que é um material muito leve para obras civis. No entanto, o CLT, por ser um material maciço, apresenta excelente capacidade estrutural, o que tornam o processo construtivo em CLT atrativo e competitivo em relação à construção tradicional brasileira.

Já em outros países, a cultura do uso da madeira para a construção civil está conectada as tradições, como é o caso da Áustria. Além da representatividade deste país em relação ao desenvolvimento do CLT, também o Canadá tem sido um importante país para o impulsionamento da utilização de CLT aplicado às edificações. O país tem uma forte cultura ambiental e é um país de imensas áreas florestais, onde a indústria da madeira tem um impacto significativo na economia. Conforme Mohammad (2011), as florestas canadenses são responsáveis por cerca de 10% da cobertura florestal do mundo e representam 30% das florestas boreais do mundo, no entanto, menos de 1% das florestas canadenses são extraídas. Neste sentido, o governo canadense tem sido patrocinador de projetos de demonstração de CLT, além disso, o seu empenho na criação de códigos e regulamentos sobre madeira massiva oferecem novas oportunidades para o seu uso no país.

Outros países, como Austrália, mesmo que não tenham a cultura madeireira enraizada, tem utilizado a técnica construtiva do CLT nos últimos anos como aposta para edifícios sismicamente resistentes e que respondam bem as necessidades iminentes de redução do impacto gerado pela construção civil.

No Reino Unido, mais precisamente em Londres, em 2009 foi desenvolvido o projeto de um edifício vertical em CLT, o *Stadthaus*. O objetivo do projeto foi demonstrar que, através do uso de painéis de CLT, é possível dar resposta à necessidade do Reino Unido em construir habitação de grande densidade, de acordo com o desenvolvimento sustentável, sendo um exemplo pioneiro de arquitetura de emissão de carbono neutra. Segundo dados de Costa (2013) a aceitação do edifício no mercado foi tamanha que todos os apartamentos foram vendidos em apenas duas horas após o seu lançamento.

Ainda conforme estudo de caso, todo o edifício foi montado em 49 semanas, sendo o tempo estimado de construção de um edifício similar, em alvenaria convencional, em cerca de 72 semanas. O material foi transportado desde a Áustria até ao Reino Unido em 21 caminhões.



Sendo que, por questões de restrições do transporte, o comprimento e larguras dos painéis foram limitados aos máximos de 14m e 2,95m, respectivamente. A estrutura de madeira foi erguida, durante 27 dias, ao longo de 9 semanas, por uma equipa de montagem constituída por 4 homens, que trabalhava apenas 3 dias por semana.

A construção do *Stadthaus* teve o auxílio de apenas uma grua. O edifício tem nove pavimentos, sendo o primeiro executado em concreto, devido à necessidade de preservar a madeira em relação ao contato com a umidade, e os demais pavimentos em CLT, sendo compostos por um núcleo central de CLT mais espesso para garantir maior resistência ao fogo nas áreas de circulação vertical.

Além do *Stadthaus*, diversos edifícios em CLT já foram construídos pelo mundo, sendo que a produção de edificações em CLT se intensificou a partir da virada do século XXI. Dentre as vantagens estão a versatilidade da técnica, adaptabilidade a projetos, ganhos em termos de área (menor dimensão das paredes em relação a alvenaria), redução no tempo de montagem e construção seca, obra limpa, alto rigor durante o projeto, modulação das peças e redução de desperdício (COSTA, 2013).

Outras características positivas ainda são a versatilidade de projeto, a adaptação à sistemas híbridos, podendo trabalhar em conjunto com outros materiais, o comportamento monolítico, semelhante a estruturas de alvenaria e concreto armado, tornando o conjunto estrutural mais rígido e, finalmente, a baixa condutividade da madeira que assegura a redução das pontes térmicas e um grau de massa térmica capaz de reduzir os gastos de energia de aquecimento/arrefecimento.

No entanto, alguns pontos negativos, tais como a necessidade de um projeto detalhado e que permite poucas alterações após a fabricação são levantados. Além disso, o uso do projeto é limitado a edificações compartimentadas devido à reduzida capacidade em se executar a técnica com grandes vãos envidraçados, visto que, o sistema é monolítico e que as paredes exercem função estrutural. Além de necessitar revestimento externo e ser suscetível ao contato com o solo.

A seguir, o Quadro 01 mostra as principais edificações verticais elaboradas em CLT pelo mundo. A partir de sua análise é possível concluir que apesar de o CLT ter sido desenvolvido no início dos anos 90 e sua primeira edificação, uma casa construída na Alemanha ter sido feita em 1995 (MADEIRA E CONSTRUÇÃO, 2018), foi a partir dos anos 2000, com o desenvolvimento da tecnologia e de fábricas do produto, que o CLT pode ser fabricado em maior escala e utilizado como matéria prima para edificações verticais, sendo a Europa o campo de seu desenvolvimento inicial, passando a ser exportada para outros continentes, como

América do Norte, Oceania e iniciativas de projetos também na Ásia e América do Sul. A partir da última década, o uso do material tem crescido de modo exponencial e tem permitido que edificações de até 18 pavimentos sejam construídas apenas em madeira (ARCHDAILY BRASIL, 2019b).

QUADRO 1 – EDIFÍCIOS EM CLT PELO MUNDO: PANORAMA DAS PRINCIPAIS OBRAS

(continua)

Ano	local	tipo	Edifício	Pavtos./ Status	Imagem	Fonte
1995	Alemanha	Primeira Casa em CLT	Moser	1/ concluída		Madeira e Construção (2018)
2001	Áustria	Resid. Multif.	Muhlweg Project	4/ concluída		Costa (2013)
2005	Noruega	Resid. Multif.	Svartlamoen	6/ concluída		Costa (2013)
2006	Suíça	Resid. Multif.	Holzhausen	6/ concluída		Costa (2013)
2008	Alemanha	Resid. Multif.	Esmarchstrasse	7/ concluída		Costa (2013)
2008	Suécia	Hotel	Copperhill Mountain Lodge	5/ concluída		ONG European Wood (2018)
2008	Reino Unido	Resid. Multif.	Stadthaus	9/concluída		Costa (2013) e Waugh Thistleton Architects (2018)
2009	Noruega	Resid. Multif.	Barents House	20/ estudo		Reiulf Ramstad Architects (2018)
2009	Suécia	Resid. Multif.	Limnologen Precinct	7/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016)
2010	Suécia	Escola Superior	School of Architecture in Umeå	4/ concluída		ONG European Wood (2018)
2011	Alemanha	Resid. Multif.	Holz 8	8/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016)













QUADRO 2 – EDIFÍCIOS EM CLT PELO MUNDO: PANORAMA DAS PRINCIPAIS OBRAS

(continua)

Ano	local	tipo	Edifício	Pavtos./ Status	Imagem	Fonte
2011	Reino Unido	Resid. Multif.	Bridport	8/ concluída		Costa (2014) e Waugh Thistleton Architects (2018)
2012	Áustria	Escritórios	LifeCycle Tower	8/ concluída		Costa (2013)
2013	Austria	Resid. Multif.	Wagramer-strasse	7/ concluída		Costa (2013)
2013	Itália	Resid. Multif.	Via Cenni	9/ concluída		Costa (2013) e Invidiata (2018)
2013	Austrália	Resid. Multif.	Forté	10/ concluída		Costa (2013)
2014	Canadá	-	FFTT System	30/ estudo		Costa (2013)
2014	Noruega	Resid. Multif.	Treet	14/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016)
2015	Finlândia	Resid. Multif.	Puukuokka	9/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016)
2015	Reino Unido	Resid. Multif.	Trafalgar Place	10/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016) e Waugh Thistleton Architects (2018)
2015	Reino Unido	Resid. Multif.	Banyan Wharf	10/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016) e Waugh Thistleton Architects (2018)
2015	Reino Unido	Resid. Multif.	Dalston Lane	10/ concluída		Dovetail Partners Inc. (2016) e Waugh Thistleton Architects (2018)
2016	Estados Unidos	Escritórios	T3	7/ concluída		Architect Magazine (2018a)
2017	Canadá	Resid. Multif.	Origine	13/ concluída		Wood-works (2018)

### QUADRO 3 – EDIFÍCIOS EM CLT PELO MUNDO: PANORAMA DAS PRINCIPAIS OBRAS

(conclusão)

Ano	local	tipo	Edifício	Pavtos./ Status	Imagem	Fonte
2017	Canadá	Resid. Univ.	Brock Commons	18/ concluída		Teshnizi et al. (2018)
2017	Austrália	Escritórios	International House Sydney	6/ concluída		Architecture AU (2018)
2017	França	Resid. Univ.	Lucien Cornil student residence	8/ concluída		InexHibit (2018)
2017	Suiça	Escritórios	Suurstoffi 22	10/ concluída		Woodrise (2017)
2018	Áustria	Escritórios	Ho Ho Vienna	24/ em const.		Dovetail Partners Inc. (2016)
2018	Canadá	Resid. Multif.	Tree Tower Toronto	18/ projeto		Gazeta do Povo (2018a)
2018	Noruega	Resid. Multif.	Mjøstårnet	18/ concluída		Archdaily Brasil (2019b)
2019	França	Resid. Multif./ Comercial	Sensation	11/ em const.		Le Moniteur (2019)
2020	Brasil	Coworking	Amata	12/ projeto		Archdaily Brasil (2019c)
2041	Japão	Multiplo	W350	70/ projeto		Gazeta do Povo (2018b)

FONTE: A autora (2018) com base nas fontes citadas pela tabela.

## 2.3 MATÉRIA PRIMA, CAPACIDADE ESTRUTURAL E NORMATIZAÇÃO

O CLT, por ter surgido na Alemanha e Áustria e ser um material tradicionalmente utilizado em países próximos ao polo Ártico, como o Canadá e Finlândia, é usualmente feito em madeiras que melhor se desenvolvem em florestas plantadas nestes locais, como é o caso

das árvores do gênero *Picea spp.*, também conhecida popularmente com os nomes de *piceas*, *abeto* e *spruce* ou *espruces*. Na Áustria 67% das florestas são compostas por coníferas, sendo que 80% das árvores são a *Picea abies*, conforme Passarelli (2013). As árvores do gênero *Picea spp.* são coníferas, ou também conhecidas como árvores de madeira macias. As características mais marcantes do gênero de árvores são seu longo período para crescimento e porte, podendo chegar a até 70 metros e em algumas espécies mais de 100 metros. Também suas características físicas são importantes para que sejam feitos os painéis de CLT, dentre elas se destaca a densidade da madeira, características visuais, facilidade de manuseio e adaptabilidade ao uso.

Segundo dados da fabricante KLH (2018), a madeira utilizada para os painéis é o *spruce*, podendo ser usado o pinheiro, abeto, pinheiro pedra ou outras madeiras conforme a demanda. No entanto, outras espécies também podem ser utilizadas para a sua fabricação, tais como *Abies alba*, *Pinus sylvestris*, *Larix decidua*, *Pseudotsuga menziesii* e o *Pinus cembra* (BRANDNER, 2013). O corte das peças tem uma precisão de 2mm, o que representa um produto com alto nível de acabamento. A umidade das peças é de 12% podendo sofrer alterações de 2% para mais ou menos. É também importante que durante o transporte e no canteiro de obras as peças estejam protegidas das intempéries.

Já na América do Norte, a ALSC: PS 20, que regulamenta o uso da madeira lista 65 espécies de madeira macia que podem ser comercializadas nos Estados Unidos como tábuas, destas, apenas 4 espécies não atingem os níveis mínimos de densidade para uso como CLT (NIST, 2015).

No Brasil, para o uso do CLT existe o interesse em se utilizar a madeira das florestas plantadas nacionais. Para tanto, existem pesquisas que relacionam as madeiras disponíveis no Brasil com a sua capacidade de desempenho em painéis de CLT ou ainda a Madeira Laminada Colada, técnica construtiva que tem algumas semelhanças em seu processo produtivo a do CLT.

Algumas pesquisas já vêm discutindo a implantação do CLT, e quais seriam as melhores espécies para esta finalidade. A madeira produzida em florestas plantadas no Brasil que tende a ter maiores semelhanças com aquela utilizada em outros países produtores de CLT é o *Pinus spp.*, devido a ser também uma árvore da família das coníferas e apresentar características físicas semelhantes a *Picea spp.*. A espécie mais encontrada nas florestas plantadas brasileiras é o *Pinus Elliotti* e em menores proporções está o *Pinus taeda*, no entanto, a maior produção de madeira reflorestada no Brasil é a de *Eucalyptus*, que corresponde 72% da área reflorestada (IBA; POYRI, 2017). Algumas pesquisas testam ambas as espécies para a fabricação de CLT e suas características de resistência, como é o caso da pesquisa de Alencar e Moura (2014). Esta pesquisa testa o *Pynus spp.* e o *Eucalyptus grandis* quanto a sua resistência

ao cisalhamento entre os painéis. A pesquisa aborda um possível uso para as sobras de madeira provenientes de indústrias da madeira no interior do Paraná.

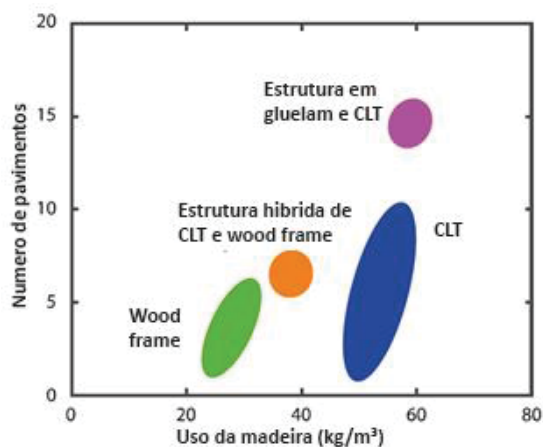
Neste sentido, a empresa CrossLam Brasil vem fabricando painéis de CLT com madeira de *Pinus Taeda* e em casos específicos pode fazer o painel também com o *Eucalyptus grandis* (CROSSLAM, 2019). Na Europa e América do Norte, a aplicação de madeira dura, como é a classificação do *Eucalyptus* para a fabricação de CLT ainda é um estudo recente, tendo sido apenas alguns edifícios fabricados em espécies de madeira dura (EHRHART; BRANDNER, 2018).

Ainda se pode destacar que segundo a empresa fabricante de CLT na Áustria, a KLH (2018) existem três classificações de CLT quanto a sua aparência para o uso, são elas: qualidade visual doméstica (DVQ) – usada para edificações em que a madeira possa ficar exposta; qualidade visual industrial (IVQ) – utilizada para fins industriais, podendo os painéis apresentar mais imperfeições superficiais; e sem qualidade visual (NVQ) – que são painéis de CLT para finalidades em que as peças não fiquem visualmente expostas, tais como telhados e lajes.

Com relação a orientação das fibras da madeira, as camadas externas em ambos os lados devem estar no mesmo sentido, preferivelmente com as fibras no sentido vertical, paralelas a força gravitacional, a fim de maximizar a capacidade vertical de carga das paredes estruturais. Na mesma lógica compositiva, os painéis usados como laje e telhado, as camadas externas seguem paralelas à direção do maior vão (KARACABEYLI; DOUGLAS, 2013).

O CLT é um sistema construtivo que pode ser utilizado em edificações de até 10 pavimentos, sendo que em dimensões superiores a isso o CLT pode ser feito complementado com outros sistemas construtivos, tais como a Madeira Laminada Colada em sistemas híbridos de madeira (RAMAGE et al., 2017), conforme o Gráfico 02, ou ainda em conjunto com estruturas metálicas. Assim, edificações exclusivamente em CLT tem seus vãos máximos determinados a partir das características da espécie de árvore a ser utilizada.

GRÁFICO 2 – A DENSIDADE DA MADEIRA ESTRUTURAL USADA PARA ATINGIR UMA DETERMINADA ALTURA DE CONSTRUÇÃO PARA VÁRIOS SISTEMAS ESTRUTURAIS



FONTE: Adaptado de Ramage et al. (2017).

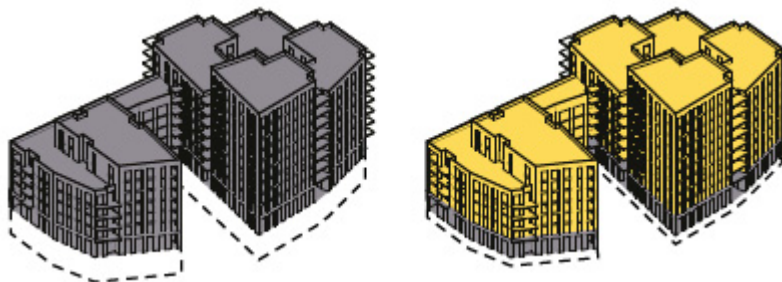
## 2.4 MODO DE CONSTRUÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM CLT

### 2.4.1 Estrutura e construção

Com relação as vantagens do uso do CLT aplicado à edificações, as vantagens do seu uso iniciam ainda na fase das fundações, uma vez que o reduzido peso dos painéis representa uma redução de carga total se comparado a edificações em concreto e alvenaria, com isso, é possível inferir que as cargas na base também são menores, resultando em fundações com menores dimensões e, consequentemente, em redução de material de fundação, assim como mostra a Figura 04.

É importante ressaltar que a equipe de projeto normalmente usa como diretriz o uso de materiais resistentes à umidade nas partes mais baixas da edificação, quando o CLT é aplicado a edificações em altura, reduzindo assim o contato da madeira com o solo e a transferência de umidade, como é o caso de edificações em CLT executadas em Londres (COSTA, 2013), Vancouver (TESHNIZI et al., 2018) e Sidney (ARCHITECTURE AU, 2018).

FIGURA 4 – INDICAÇÃO DE REDUÇÃO DE DIMENSÃO DAS FUNDAÇÕES REQUERIDAS EM UMA EDIFICAÇÃO DE CONCRETO EM RELAÇÃO A MESMA EDIFICAÇÃO EM CLT, O CASO DO DALSTON WORKS BUILDING.



FONTE: Waugh Thistleton Architects (2018).

Após a execução da fundação, passa-se para a fase de montagem dos painéis, nesta etapa é importante que um plano de logística esteja montado, para que os painéis cheguem em obra no momento certo para serem içados, neste caso, não necessitando de grandes áreas no canteiro de obras para a armazenagem do material.

A mão de obra requerida durante o período de montagem dos painéis precisa ser especializada, uma vez que este processo acontece em um período curto e que as corretas conexões entre as peças sejam feitas para que respondam as necessidades de cargas aplicadas ao local. Como exemplo tem-se o caso de um hotel construído na cidade de Bordolino, na Itália. Segundo Hackenthal (2013) sua construção foi estimada em apenas três meses se usando o CLT como material, já se a edificação fosse feita em concreto o tempo estimado era de cerca de dois anos.

Para que o CLT seja considerado um sistema autoportante, ele precisa ser executado por meio de painéis fixados que permitam que todo o sistema trabalhe em conjunto como uma estrutura única, a fim de resistir as cargas atuantes na estrutura tais como peso, vento, além de resistir ao fogo e tremores de terra, para isso, é importante que sejam elaboradas boas conexões entre os painéis.

Vale ressaltar que edificações em CLT tem um processo de montagem silencioso, uma vez que seus painéis são fixados por meio de junções. No caso de edificações em CLT, diferentes formas de junção já foram desenvolvidas, sendo as mais recorrentes, junções por meio de articulações, parafusos, pregos e até mesmo conexões coladas (KUILEN et al., 2011). Desta forma, as junções disponíveis no mercado e a especialização da mão de obra em executar determinados tipos de junções são um fator limitante de seu processo de montagem.

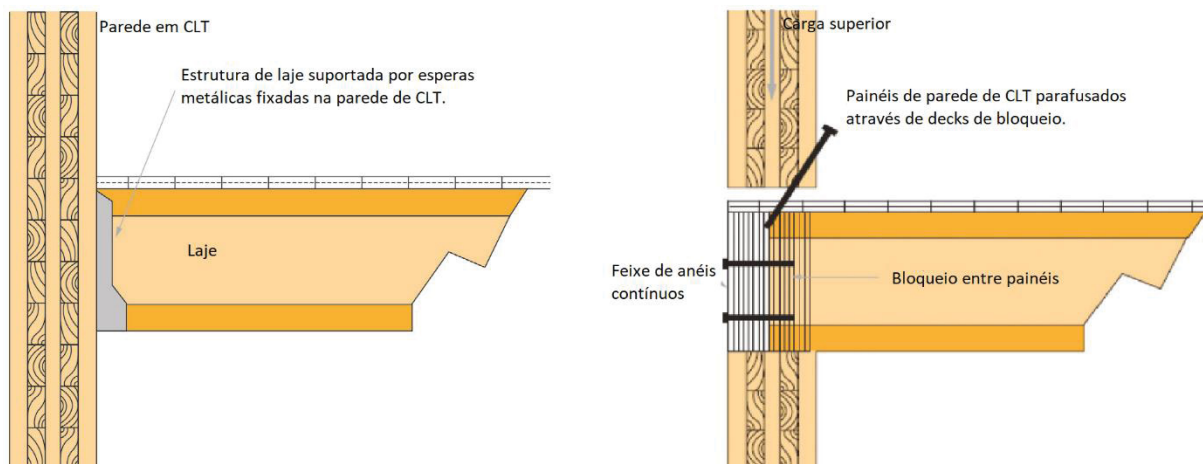


## 2.4.2 Conexões

As conexões são elementos necessários para unir os painéis de CLT, sendo que estes acontecem mais comumente entre painéis (parede e lajes ou telhado – vertical e horizontal) ou ainda com outros materiais, como o caso das conexões com a base e fundações. Além das conexões já citadas como as mais comuns utilizadas na técnica construtiva do CLT, também outras formas inovadoras tem sido desenvolvidas para facilitar a montagem e garantir bom desempenho da estrutura (MALLO; ESPINOZA, 2014), como é o caso de um sistema que permite conectar 3 painéis em um único nó, reduzindo, assim, o numero de conexões e trazendo maior precisão no momento de montagem (ROTHOBLAAS, 2018).

Ainda com relação as conexões entre as peças, elas podem acontecer de duas formas, no método de estrutura em balão (*balloon-frame*) e na forma de estrutura em plataforma (*platform-frame*), conforme pode ser visto nas Figuras 05a e 05b. Segunda a Structural Timber Association (2015), a estrutura em balão pode ser descrita como um método onde os pisos são suportados pela face interna das paredes, que são contínuas por um ou mais níveis. Já a estrutura em plataforma consiste em um método de construção onde a estrutura do piso é apoiada em paredes de suporte de carga que atua como uma plataforma para o próximo nível de construção. Desta forma, as soluções em CLT criam uma estrutura como que em um favo de mel, de paredes estruturais e lajes, permitindo a criação de diferentes possibilidades estruturais e dando maior liberdade aos projetistas.

FIGURA 5 A E 5 B – ESTRUTURA DE CLT EM BALÃO E EM PLATAFORMA



FONTE: Adaptado de Structural Timber Association (2015).

Após a montagem dos painéis, a estrutura da edificação está preparada para receber os sistemas complementares, tais como instalações hidráulicas e elétricas, previstos ainda durante a fase de fabricação dos painéis para receber os recortes dos dutos de modo automatizado. Com isso, utilizar a técnica construtiva do CLT exige que os projetos estejam compatibilizados e com alto grau de precisão, uma vez que permite poucas alterações posteriores.

#### 2.4.3 Revestimentos

De acordo com Costa (2013) é possível combinar diferentes materiais de revestimentos ao CLT, sendo que o fator mais importante a ser levado em consideração é a garantia de que as fachadas estejam ventiladas e que sejam aplicadas barreiras de proteção contra o vapor, a fim de proteger a madeira do processo de condensação da água. Desta forma, conforme pontua Ahvenainen e Sousa (2016), é importante que o CLT não esteja exposto as condições climáticas externas.

Dentre os materiais que podem ser utilizados para revestimento estão painéis de fibrocimento, como os usados no edifício Via Cenni, em Milão- Itália (INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI 2018), revestimentos cerâmicos e tijolos, assim como no maior edifício em área já fabricado em CLT, o Dalston Works building e o Barretts Grove Residential, ambos situados em Londres- Inglaterra (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018 e ARCHDAILY BRASIL, 2019a). Cobertura em painéis de vidro, usualmente aplicado a partes do edifício, tal como o caso de Kingsgate House, que tem vidro e painéis solares em PVC cobrindo a fachada (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018), ou ainda como o International House Sidney, na Austrália, onde 7920 metros quadrados do edifício de escritório foram cobertos com vidro, deixando a estrutura de madeira exposta no interior do edifício (ARCHDAILY, 2019).

Um material bastante utilizado como revestimento é o painel metálico, uma vez que são de fácil instalação e remoção. Dentre seus exemplares estão o icônico Stadthaus e o Fairmule House, em Londres, revestidos com aço galvanizado (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018). Também podem ser aplicados painéis de menor dimensão em madeira, de pedras ou ainda o uso de reboco e pintura para cobrimento dos painéis de CLT.

É ainda possível que a madeira seja deixada aparente, principalmente nas áreas internas de uso seco, tais como salas, quartos, circulação e outros, assim facilitando a visualização da estrutura e dos sistemas bem como trazendo a madeira como elemento visual para o projeto. Além disso, uma possibilidade que aparece hoje é a combinação do CLT com



concreto em edificações altas e arranha-céus, um sistema conhecido com arranha-céus de madeira-concreto (KUILEN et al., 2011). Neste caso, cada parte da edificação deve ser analisado para que a manutenção e durabilidade dos diferentes materiais seja garantida.

#### 2.4.4 Concepção de projetos em CLT

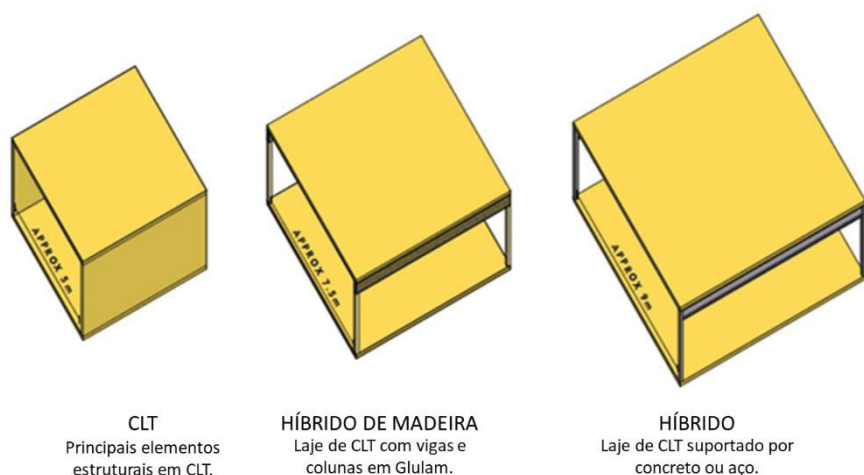
É preferível que a escolha do uso do CLT como sistema construtivo de uma edificação seja definida ainda durante os primeiros estágios do projeto, no entanto, é possível que um projeto seja adaptado com relação a sua estrutura e vedação para que seja feito em CLT, desde que respeitadas as limitações do material.

Costa (2013) fez um estudo transformando uma edificação de alvenaria de seis pavimentos em uma edificação em CLT em Portugal, sendo que para isso apenas algumas pequenas alterações foram necessárias, principalmente por conta dos vãos que utilizavam vidro e também no alinhamento de paredes para que estas pudessem ser feitas com painéis únicos de CLT, assim, modulando o projeto. Como conclusão de seu trabalho, o aumento em área propiciado pelo uso do CLT está entre as principais vantagens.

Sobre a concepção de edificações em CLT, sua altura e limitações do terreno podem ser determinantes e representar importantes indicações sobre as limitações no uso do material, de forma que a escolha do material deve ir de encontro com as diretrizes do projeto e com seu programa de necessidades. Com isso, em alguns casos, o projeto requer diferentes soluções estruturais, sendo os vãos livres determinantes para a escolha de uma estrutura exclusiva em CLT, híbrida de madeira ou ainda híbrida em madeira e outros materiais.

Como regra geral tem-se que edificações com vãos livres de até 5 (cinco) metros podem ser feitos com estruturas exclusivas em CLT, já as soluções de estrutura híbrida de CLT com outros produtos de madeira engenheirada podem atender a vãos de até 7,5 (sete e meio) metros, e ainda para vãos maiores indica-se o uso de soluções híbridas de CLT com outros materiais de construção, sendo que para lajes de CLT de até 9 (nove) metros é indicado a estruturação com concreto ou estrutura metálica, conforme pode ser visto na Figura 06.

FIGURA 6 – VÃO LIVRE DE EDIFICAÇÕES EM CLT E SOLUÇÕES COM COMBINAÇÕES HÍBRIDAS



FONTE: Adaptado de Waugh Thistleton Architects (2018).

Com relação ao uso do CLT, o livro *100 projects UK CLT*, de Waugh Thistleton Architects (2018), levantou 100 edificações elaboradas em CLT no Reino Unido, destes, 36 projetos foram feitos exclusivamente com estrutura em CLT, no entanto, quando analisadas apenas as edificações residenciais, a escolha exclusiva do CLT como material estrutural sobe para cerca de 65% das edificações, em virtude de seus vãos estarem mais relacionados as dimensões de cômodos domésticos. Assim, a escolha em criar estruturas mistas ou híbridas acontece devido ao tamanho dos vãos e pelo contato da madeira com a umidade.

A partir da análise dos projetos residenciais de médio e grande porte em CLT é possível verificar que a construção do pavimento térreo em concreto é uma diretriz, não apenas por conta da umidade ascendente, como também por permitir que neste andar uma configuração interna diferente daquela dos pavimentos de apartamento.

O projeto do *Brock Commons*, em Vancouver- Canadá (TESHNIZI et al., 2018) é um exemplo de edificação construída sobre um nível de base em outro material, sendo que neste caso ainda os elevadores e escadas de emergência foram executadas em concreto para atender a legislação vigente do país com relação à resistência ao fogo.

Entretanto, Abrahamsen (ARCHDAILY BRASIL, 2019b), responsável pela construção do edifício Treet, na Noruega, com 14 pavimentos e do edifício *Mjøstårnet*, também na Noruega e com 18 pavimentos, considera a largura da base o fator determinante para a altura de uma edificação de madeira massiva. Neste sentido, o edifício *Mjøstårnet* tem 16 metros de largura de base e acredita-se que este seja o principal fator que possibilita ao edifício atingir uma altura de 81 metros.

A pesquisa de Kuilen et al. (2011) com relação aos limites de altura de edificações em CLT indica que em uma edificação com 40 pavimentos e cerca de 150 metros de altura projetada com as paredes externas em CLT constatou que nos pontos de tensão do prédio, barras de aço deveriam ser instaladas para resistir a estas cargas, indicando que para edificações em altura estruturas mistas devem ser requeridas no atendimento as tensões.

A respeito da destinação final dos painéis em um cenário de final de ciclo de vida, é indicada sua utilização como biomassa, assim como a destinação que é feita com os recortes de painéis de madeira em fábrica, no entanto, é possível ainda dar uma outra destinação àqueles de maior dimensão, provenientes, principalmente, de recortes das esquadrias, segundo a DIM 68800-2 6.3b (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2012) isto acontece graças ao teor de umidade da madeira em serviço ser inferior a 20%, sendo suficiente para evitar danos causados por insetos sem que o tratamento precise receber tratamentos químicos. Estes painéis podem ser destinados a elaboração de móveis para a edificação, como é o caso da escola Kingsdale no Reino Unido (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018).

Além disso, a redução dos processos químicos da madeira garante menor impacto ambiental, bem como permite que possa ser usado como acabamento nas áreas internas. Desta forma, a qualidade estética da madeira pode ser apontada como uma das razões de fomento do uso do material.

Em uma *survey* aplicada nos Estados Unidos sobre o conhecimento e aceitabilidade de profissionais da área com relação ao CLT, a conclusão foi que a estética do material é importante para 94% dos participantes (MALLO; ESPINOZA, 2015). Asdrubali et al. (2017) ainda complementa dizendo que o contato humano com a madeira é responsável por uma maior qualidade dos espaços, reduzindo os níveis de estresse e funcionando como um controlador de umidade, afetando diretamente a qualidade interna do ar.

#### 2.4.5 Custos do CLT

O custo da construção de uma edificação é determinado durante o seu projeto. Assim também a escolha pelo uso do CLT, em oposição ao uso de outras técnicas construtivas deve ser determinada durante o projeto.

Apesar de ainda não haver um consenso com relação ao custo do material, devido a instalação de fabricas de CLT ainda estarem concentradas em algumas regiões produtoras de madeira reflorestada, tal qual o sul da Alemanha, Áustria, países escandinavos, como a Finlândia, além do crescimento no Canadá, incentivado pelo desenvolvimento de legislações

específica para produtos de madeira engenheirada, pontualmente nos Estados Unidos e no Brasil que se observa o desenvolvimento de uma fábrica de CLT, o custo de utilizar o CLT nas edificações pode ser bastante competitivo, a depender da oferta daquela região.

Assim, o fator limitante com relação ao uso deste material ainda está na concentração da produção dos painéis em determinadas regiões com grande estoque de madeira na forma de florestas plantadas, fazendo com que o transporte do material seja um dos principais desafios de expansão de técnicas construtivas de madeira massiva.

No entanto, o uso do material, ainda que este apresente um custo inicial mais alto do que outros materiais ou técnicas construtivas, pode ser justificado devido ao ganho de tempo e mão de obra durante sua montagem. Se comparado ao concreto armado, o CLT é cerca de 20% mais rápido durante a montagem e execução de acabamentos, sendo este valor multiplicável ao número de pavimentos, tornando-se ainda mais atrativo em edificações em altura (MALLO; ESPINOZA, 2014). Segundo este estudo, o aumento da aceitação do CLT se deve, principalmente, ao maior conhecimento e aceitação das técnicas construtivas pelos profissionais da área.

A Universidade da Columbia Britânica, em Vancouver – Canadá, construiu um edifício híbrido em CLT como residência para estudantes com 18 pavimentos a fim de aumentar o contato da comunidade com edificações em madeira, ainda utilizando esta edificação para diversos estudos com relação a durabilidade, manutenção, desempenho e impacto.

Para fins comparativo, outra edificação, com similaridades em relação a área e altura foi construída em concreto. Um estudo comparativo entre estas edificações concluiu que o custo do edifício em CLT foi cerca de 11% maior do que em concreto (TESHNIZI et al., 2018). Infere-se a partir desta afirmativa que ainda que o CLT apresente uma baixa oferta por fábricas produtoras, tem valor bastante competitivo em relação a outras técnicas construtivas consolidadas e de grande oferta pelo mercado, tal como o concreto.

Outros estudos também foram elaborados comparando os custos do CLT à materiais tradicionais da construção civil. Ainda que alguns estudos tenham concluído que há uma equidade em relação aos custos do CLT quando comparado a outras técnicas construtivas (GREEN, 2012; MAHLUM et al., 2014), a maior parte dos estudos comparativos concluem que o custo do material ainda é mais alto do que o de outras técnicas construtivas tradicionais (TAKANO; HUGHES; WINTER, 2014a; INVIDIATA; LAVAGNA; GHISI, 2018; KUMAR PAL et al., 2017).

Todavia, o custo de inovação do produto e o número reduzido de fábricas ainda é apontado como fator determinante para seu custo elevado. Com isso, é possível concluir que a

fabricação do CLT tem grande potencial de expansão e capacidade de maior competitividade no mercado. Todavia, o estudo de Gieseke et al. (2015) ainda aponta a falta de conhecimento com relação ao material e ao seu desempenho ambiental como barreiras na adoção em larga escala pelo setor da construção civil.

## 2.5 O CLT NO BRASIL

A madeira utilizada para a fabricação do CLT não precisa ter padrões rigorosos de resistência e qualidade estética, contudo precisam não estar comprometidas estruturalmente (RAMAGE et al., 2017). A partir desta afirmação surge a dúvida de quais são as principais árvores utilizadas para a fabricação do CLT, suas características e quais árvores poderiam ser plantadas no Brasil e responderiam bem ao uso pelo CLT.

Mesmo diante dos apelos de sustentabilidade, ainda existem preconceitos com relação à utilização de madeira para edifícios de múltiplos pavimentos, principalmente, por associar o material ao baixo desempenho quanto à segurança contra incêndio, segurança estrutural e durabilidade (RAMAGE et al., 2017).

Apesar destes preconceitos em relação a madeira, o CLT é um processo de laminação cruzada da madeira que busca solucionar a insegurança em relação à aplicação da madeira na construção civil, isto acontece devido ao fato de transformar a madeira em painéis maciços e por oferecer um material apropriado, resistente e durável para a construção de edifícios, além de agregar valor e controle tecnológico a obra.

Como já dito anteriormente, o CLT cria uma estrutura monolítica e este comportamento de criar um conjunto de camadas mais cola é o que dá as peças de CLT uma maior resistência do que aquela encontrada em peças maciças de madeira serrada, ainda que de mesma espécie, e é este fator que permite que o CLT tenha flexibilidade de usos e permita construções em altura não antes vistas em estruturas de madeira.

Em relação a pesquisas que analisem o cenário de implantação do CLT no Brasil, o trabalho de Passarelli (2013) aborda diretrizes para projetos de painéis maciços em CLT no contexto do estado de São Paulo. É interessante ressaltar que a partir de uma revisão bibliográfica comparativa entre as florestas austríacas e as florestas paulistas a pesquisa conduz a visualização de que o estado brasileiro produz mais madeira proveniente de árvores de *Eucalyptus spp.*

No entanto, a destinação final desta madeira é bastante diferente daquela encontrada na Áustria, onde há a predominância de beneficiamento da madeira para diversos fins

industriais, e não para o processamento de produtos como o papel e celulose, conforme o que acontece no Brasil.

Desta forma é possível concluir que ainda que o estado não tenha uma produção tão relevante quanto o país europeu em termos de árvores de coníferas, um dos fatores motivadores para isso é a destinação final da madeira, podendo este cenário de produção ser revertido dentro de um pequeno prazo de tempo e com investimento medianos, segundo a pesquisa.

Já Pereira (2014) em sua dissertação também estuda um dos aspectos do CLT aplicado no contexto nacional, buscando criar uma metodologia de ensaios de carga para estruturas de painéis de Madeira Laminada Cruzada Colada (CLT) a fim de contribuir para a normatização do produto no Brasil.

Silva, Chirinéa e Barros (2016) levantam as principais oportunidades e desafios para a utilização do CLT no Brasil. Dentre elas estão a automação do processo de fabricação, ganho de economia, redução de desperdício, uso da madeira como fonte renovável de matéria prima. Já os desafios colocados pela pesquisa são a aceitação da tecnologia por parte dos projetistas, construtores e consumidores, investimentos industriais para sua produção, proximidade da fábrica de reflorestamentos e principalmente a aceitação da técnica por órgãos normatizadores e criação de normas técnicas, processo este que pode ser moroso e custoso ao setor produtivo interessado.

Do ponto de vista mercadológico, o Brasil ainda não tem nenhum edifício em altura construído em CLT ou híbrido de madeira, no entanto, iniciativas como a do projeto do primeiro edifício em CLT do Brasil em São Paulo, está sendo desenvolvido pelo escritório de arquitetura *Triptyque*, contando com 13 pavimentos, destinados a coworking e coliving (ARCHDAILY BRASIL, 2019c).

Ainda que algumas pesquisas brasileiras e empresas tenham se interessado pelo estudo e desenvolvimento do material no Brasil, é perceptível a necessidade de mais estudos com abordagens de diferentes pontos de vista e aspectos do CLT e investimento a fim de permitir uma visão sistêmica da técnica e sua relação de usos no contexto nacional. Portanto, esta pesquisa pode contribuir na discussão do uso do CLT no Brasil, apresentando uma nova abordagem e pretendendo estimular novas pesquisas neste tema.

## 2.6 LEGISLAÇÃO DE MADEIRA MASSIVA

O Brasil, assim como diversos outros países, ainda não tem uma legislação específica para edificações em madeira massiva, desta forma, a legislação de referência para edificações

em madeira é a NBR 1790 (1997), sobre projetos estruturais em madeira. É importante pontuar que esta norma é utilizada também para edificações em *wood frame*, pois o país ainda não conta com norma específica para este tipo de edificação, tornando o processo moroso e trazendo dificuldade em relação a aprovação de projetos.

A Europa, como berço da fabricação do CLT, está desenvolvendo normas que regulamentam seu processo de fabricação e de projeto estrutural. A norma que regulamenta o processo de fabricação dos painéis de CLT, a EN 16351 (2015). Esta norma é responsável por criar parâmetros e padrões para a fabricação de painéis de CLT, resultando em maior qualidade e controle tecnológico dos processos em todo o território europeu.

Já o *Eurocode 5* é a norma europeia utilizada para o cálculo de projetos estruturais em madeira, sendo que, o CLT deve passar a ser contemplado também dentro desta norma. Este faz parte de um conjunto de normativas de mesmo nome e que estabelecem regras para projetos estruturais de diferentes materiais em toda a área de abrangência econômica europeia. O *Eurocode 5* é responsável por estabelecer regras gerais e fórmulas para projetos estruturais de edificações em madeira maciça, madeira serrada, madeira laminada colada ou outros materiais elaborados com madeira tais como LVL, Madeira Laminada Colada e CLT (EN 1995, 2004).

No entanto, em outros países ainda não há uma legislação que estabeleça os parâmetros para a fabricação e para cálculo de estruturas em CLT, apesar de alguns daqueles que são grandes produtores de madeira estarem iniciando um processo de criação de normas e códigos para cálculo estrutural de madeira massiva.

Sendo assim, a falta de legislação específica é um dos maiores dificultantes para o uso e expansão do material em diversos países, dentre eles países em desenvolvimento, como o Brasil e a China. Conforme aponta Dong et al. (2019), o Ministério da habitação e desenvolvimento urbano-rural da China (MOHURD, 2019) anunciou no ano de 2009 a promoção do uso de materiais de construção civil que promovessem a economia de energia, no entanto, mesmo sendo o CLT um material capaz de atender a estas a esta premissa, o país ainda não tem uma norma que regule o seu uso, sendo que para este estudo de caso, foi necessário que os pesquisadores utilizassem as normativas europeias como guia para o desenvolvimento da estrutura da edificação simulada, assim demonstrando a fragilidade da técnica construtiva com relação a aprovação por órgãos reguladores em diversos países.

Porém, o Canadá, primeiro país a trazer a tecnologia do CLT, sai na frente também com relação a regulamentação do uso do CLT em edificações, sendo que as primeiras pesquisas com relação a regulamentação de seu uso iniciaram em 2005, por meio da iniciativa privada. No entanto, em 2009 a modificação da norma passou a permitir edificações de até 6 pavimentos



na Columbia Britânica e a seguir também passando a ser permitida em outras províncias (CSA O86-14, 2014).

Mas foi por meio dos estudos relativos à edificação *Origine*, na província de Quebec, que foi possível provar que edificações de até 12 pavimentos em madeira atendessem a performance e aos objetivos dos códigos vigentes, por meio da comprovação de “medidas equivalentes” de resistência estrutural e resistência ao fogo, comprovadas por meio de testes laboratoriais. Portanto, após estas comprovações, a província de Quebec, no ano de 2015, passa a permitir a construção de edificações com até 12 pavimentos construídos em madeira (WOODWORKS, 2018). O documento *Mass Timber Buildings of up to 12 Storeys* (QUEBEC, 2015) passa a ser um guia para construções em madeira na província do Quebec, Canadá.

Ainda em 2015, o *International Building Code* dá início ao reconhecimento do CLT, sendo que estão sendo previstas diversas alterações para o código internacional de edificações com o foco em edificações altas em madeira, com base nos requisitos de segurança para incêndios, área e número de pavimentos, podendo ser incluídos até 18 pavimentos de madeira, incluindo 3 novas tipologias de construção, a tipologia IV-A, IV-B e IV-C, edificações de 18, 12 e 9 pavimentos, respectivamente. A inclusão da revisão destes códigos está prevista para o ano de 2021 pelo IBC (BRENEMAN et al., 2019).

Em suma, é visível a necessidade de uma normatização para a aplicação dos painéis de CLT a edificações verticais, sendo ainda necessário parametrizar o produto a fim de que toda a cadeia produtiva da construção civil possa incorporar seu uso.

## 2.7 ESPECIFICIDADES DO PROJETO EM CLT- ESTUDO DE CASO DE TRÊS EDIFICAÇÕES EM CLT

Para as propriedades mecânicas dos painéis de CLT, assim como para outros produtos de madeira engenheirada, tais como a Madeira Laminada Colada e o LVL, o processo de produção é determinante. Conforme destaca Ahvenainen e Sousa (2016), existem requisitos estruturais mínimos para os painéis de CLT, conforme pode ser visualizado na Tabela 02.

Já para os métodos de cálculo, apesar de cálculos que consideravam a madeira como um elemento bidimensional serem as mais utilizadas para cálculo estrutural, este tipo de cálculo não é o mais apropriado para edificações em CLT, devido a sua capacidade de resistência em todos os sentidos da peça e trabalho conjunto entre painéis. Neste sentido, é possível destacar



o uso da teoria das “camadas flexivelmente conectadas” ou, mais conhecido como “método gama-  $\gamma$ ” (AHVENAINEN; SOUSA, 2016), sendo este método explicado no *Eurocode 5* (EN 1995, 2004).

TABELA 1 – VALORES DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA PARA PAINÉIS DE CLT

Parâmetro <sup>1</sup>	Valores de projeto (N/mm <sup>2</sup> )
Módulo de Elasticidade, E0,05	9160
Módulo de Elasticidade perpendicular a fibra, E90, mean	370
Módulo de Cisalhamento, G0 mean	690
Módulo de Cisalhamento, G0,05	570
Módulo de Cisalhamento Rolante, GR, mean	50
Resistência à Flexão <sup>2</sup> , fm,d	15,3
Resistência à Tração, ft,0,d	9
Resistência à Compressão Paralela às Fibras, fc,0,d	13,4
Resistência à Compressão Perpendicular às Fibras <sup>3</sup> , fc,90,d	1,6
Força de Cisalhamento, fv,d	1,6
Resistência à Flexão <sup>4</sup> , fv, R,d	0,7
Resistência à Torção, f0, T,d	1,6

<sup>1</sup> Valores sugeridos para projeto de força correspondente a  $k_{mod} = 0,8$  e  $\gamma_m = 1,25$ .

<sup>2</sup> Para elementos de CLT unidos universalmente, a resistência à flexão deve ser reduzida em 25%.

<sup>3</sup> A resistência à compressão característica perpendicular à fibra é de 3 N/mm<sup>2</sup> para todos os tipos de madeira se não houver resultados de teste disponíveis.

<sup>4</sup> A aprovação do produto deve ser consultada. A colagem das bordas pode aumentar a resistência ao cisalhamento até 1.1 N/mm<sup>2</sup>.

FONTE: Ahvenainen e Sousa (2016), *appud* Novak, Koppelhuber e Pock (2014).

Desta forma, não é apenas necessário compreender como deve ser feita a elaboração do cálculo estrutural de edificações em CLT e seus valores mínimos de resistência, como também se faz importante discutir acerca das características de edificações verticais projetadas em CLT. Para tanto, foram selecionadas três edificações para a análise descritiva do sistema construtivo em CLT, são elas:

- Edifício *Stadthaus*, na cidade de Londres, Inglaterra, composto por uma torre com nove (9) pavimentos. Projetada pelo escritório de arquitetura *Waugh Thistleton* e com sua conclusão datada do ano de 2008, sendo um edifício marcante na história do CLT, uma vez que é um dos primeiros edifícios verticais em altura que utilizam a técnica construtiva

- Complexo *Via Cenni*, na cidade de Milão na Itália, composto por quatro (4) torres de nove (9) pavimentos cada, unidas por uma base em comum. O projeto é assinado pelo escritório *Studio Rossi Prodi Associati* no ano de 2013.
- Edifício *Origine*, na cidade de Quebec no Canadá, composto por uma torre de treze (13) pavimentos. Sendo sua concepção de autoria do Grupo NEB, concluída no ano de 2017.

FIGURA 7 A, 7 B E 7 C – EDIFÍCIOS STADTHAUS, PARTE DO COMPLEXO VIA CENNI E EDIFÍCIO ORIGINE



FONTE: Adaptado de Waugh Thistleton Architects (2018); Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018); Wood-Works (2018).

A partir das três edificações, que estão em ordem cronológica, é possível inferir que as possibilidades formais da técnica construtiva em CLT tem se aprimorado ao longo do seu desenvolvimento, uma vez que, conforme pode ser inferido a partir da análise das três imagens (Figura 08a, 08b e 08c), o uso de balanços e outros elementos estéticos passam a ser mais explorados nos últimos anos.

A escolha destas três edificações aconteceu devido ao grau de informações técnicas encontradas sobre elas, sendo estas, informações a respeito da construção, painéis, vedações, base, dentre outras. Também foram levadas em consideração a escolha de edificações concluídas em diferentes períodos, podendo retratar diferentes realidades de cálculo estrutural e técnica de uso do CLT. Assim, as Tabelas 02 e 03 apresentam um comparativo entre as características construtivas das três edificações selecionadas.

A partir da análise da Tabela 02, é possível perceber que apesar das diferenças entre as edificações com relação ao seu tempo de construção, todas elas têm em comum o uso de

madeiras coníferas, mais especificamente o uso de pinheiros provenientes de florestas plantadas próximas as áreas produtoras dos painéis de CLT, sendo que a empresa fornecedora de madeira para o *Stadthaus* é a KLH, situada na Áustria. É também da Áustria a fabricante dos painéis utilizados para a construção do complexo *Via Cenni*, a empresa *Stora enso*, com sede na Finlândia. Já no caso do edifício *Origine*, o uso de madeira é proveniente do Norte de Quebec, região próxima a cidade de construção do edifício.

TABELA 2 – COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS ENTRE AS EDIFICAÇÕES STADTHAUS, VIA CENNI E ORIGINE

Edificação	N. Pavtos.	Ano	Área (m²)	N. de unid. resid.	Quant. De madeira utilizada	Carb. armaz. (t CO2E)	Custo (US\$)	Sistema de construção	Tipo de madeira utilizado	Tempo de construção (semanas)
Stadthaus	9	2008	2.601	29	901 m³	557	4.9 milhões	Plataforma	Spruce- <i>Picea spp.</i>	49
Via Cenni	9	2013	17.000	124	6100 m³	Não informado	19.2 Milhões	Plataforma	Spruce- <i>Picea spp.</i>	65
Origine	13	2017	890,00 m² por pavimento	94	Não informado	2065	19.08 milhões	Balão	Abeto negro (black spruce) <i>Picea mariana</i>	43

FONTE: A autora (2019) com base em Costa (2013), Waugh Thistleton Architects (2018), Bernasconi (2012), Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018), Stora enso (2015), Quebec (2015) e Wood-works (2018).

Ainda que a tecnologia do CLT seja relativamente nova, seus custos vem reduzindo ao longo dos anos, devido a oferta crescente, sendo assim, é possível perceber uma redução de custos da edificação em CLT quando construída na Europa, conforme pode ser constatado pela leitura do custo de duas edificações analisadas e convertida em dólares americanos dividida pela área construída, resultando, no caso do *Stadthaus*, construído no ano de 2008, em US\$ 1.883,89/ m², e no caso do Complexo *Via Cenni*, finalizado em 2013, em US\$ 1.129,41/ m².

Havendo uma redução significativa de valores por metro quadrado. Acredita-se que tenha sido causado pelo desenvolvimento do CLT, pela melhora de cálculos estruturais para madeira massiva, e também por conta de a área total das edificações comparadas pertencerem

a escalas diferentes, sendo o Complexo *Via Cenni* 6,5 vezes maior do que o edifício *Stadthaus* em termos de área.

Já para o consumo de madeira, conforme pontua Waugh Thistleton Architects (2018), se a edificação *Stadthaus* fosse construída hoje, seria possível reduzir seu consumo de madeira em 30%, devido ao uso de ferramentas modernas de análise estrutural, entretanto, pode-se calcular que foram consumidos 0,34 m<sup>3</sup> de madeira para cada metro quadrado contruído do *Stadthaus*. Já para o *Via Cenni*, este valor é de 0,35 m<sup>3</sup>, representando aproximadamente uma mesma proporção de madeira do que aquele primeiro.

Ainda da Tabela 02 é possível constatar que apenas o edifício *Origine* utiliza a técnica construtiva em balão (*ballon frame*), sendo que conforme o relatório técnico Wood-Works (2018) relata, a edificação foi erguida de três em três pavimentos, sendo os painéis de laje encaixados e presos aos painéis verticais de cerca de nove metros de altura (altura dos três pavimentos). Além disso, a partir do relatório é possível constatar que foram necessários três meses para erguer os sete primeiros pavimentos, já para erguer os últimos cinco pavimentos, apenas um mês foi necessário, devido ao aumento de conhecimento dos montadores (WOOD-WORKS, 2018). Ao contrário dos dois outros edifícios, feitos pelo sistema de plataforma (*platform frame*).

As duas edificações mais novas têm em comum a redução da dimensão dos painéis conforme a edificação cresce em altura, devido a redução da demanda estrutural da mesma. Para o complexo *Via Cenni*, as dimensões dos painéis variam de 200 a 120mm do primeiro ao nono pavimento, e para o edifício *Origine*, as dimensões de espessura das peças vão de 291 a 175mm do primeiro pavimento ao décimo segundo, conforme pode ser observado pela Tabela 03.

Já para o edifício construído antes da década de 2010, não houve redução no dimensionamento das peças, mas uma alteração em relação a configuração relativa ao núcleo estruturante, sendo este composto por dois painéis de CLT a fim de dar rigidez a estrutura e vencer a demanda acústica entre unidades habitacionais, e paredes externas constantes de 128mm.

TABELA 3 – COMPARAÇÃO DOS PAINÉIS UTILIZADOS PARA AS EDIFICAÇÕES STADTHAUS, VIA CENNI E ORIGINE

Edificação	Base e Pavto. Térreo	Estrutura Vertical- Paredes			Estrut. horiz.- Lajes		Acabamento Interno	Acabamento Externo	Ligações entre os painéis	Vedação interna
		Pavimentos	CLT- Camadas	Espessura (mm)	CLT- Camadas	Espessura (mm)				
Stadthaus	Base e térreo em concreto	Núcleo estruturante	3+3	128 + 117 (separados por 40mm de isolamento)	5	145	2 placas de gesso acartonado	Lã mineral, caixa de ar e Painéis de <i>Eternit</i>	Suporte/ placas e parafusos	CLT
		Paredes externas	3	128						
		1	5	200	5 (vão de até 5,80m)	200				
Via Cenni	Apenas base em concreto	2 ao 4	5	180			Placa de gesso 15mm	Lã de rocha, caixa de ar, painel de fibrocimento	Parafusos auto-roscantes	CLT-120mm
		5 e 6	5	160	7 (vãos de até 6,70m)	230				
		7 e 8	5	140						
		9	5	120						
Origine	Base e térreo em concreto	1 ao 3	9	291						
		4 ao 6	7	245	5	175	2 placas de gesso 16mm	Lã mineral, painéis de alumínio ou revestimento de pedra	Chapas de aço e parafusos	Vigas em Glulam e vedação em Steel frame
		7 ao 12	5	175						

FONTE: A autora (2019) com base em Costa (2013), Waugh Thistleton Architects (2018), Bernasconi (2012), Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018), Stora enso (2015), Quebec (2015) e Wood-works (2018).

Com relação a base das edificações, em dois dos casos foram adotadas edificações que elevam a madeira do solo, reduzindo seu contato com a umidade. Contudo, no caso do Complexo *Via Cenni*, apenas a base, que serve como garagem do subsolo, foi feita em concreto, sendo a edificação a partir do térreo, com suas galerias que conectam as quatro torres verticais elaboradas em CLT.

Com relação ao acabamento interno, as três edificações fazem uso de placas de gesso acartonado, variando apenas em relação a espessura. No entanto, na vedação externa apesar de haver um consenso em relação ao uso de material isolante e algum painel de proteção, no caso da edificação *Origine*, o valor de uma caixa de ar foi omitido dos dados de projeto, ainda que, seja importante que o CLT possa ser ventilado para o não acúmulo de vapores de água em sua superfície.

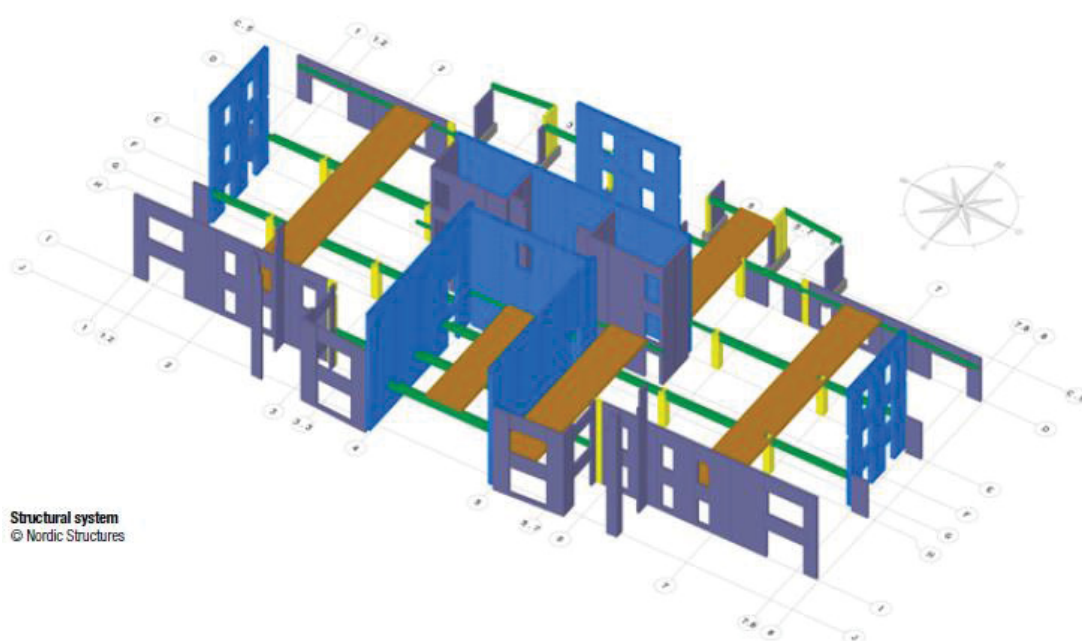
Com relação a vedação interna, também o edifício *Origine* difere dos demais, já que utiliza o *steel frame* como vedação entre cômodos da unidade habitacional, enquanto que o edifício *Stadthaus* e o *Via Cenni*, preferem trabalhar com painéis de CLT também como vedação interna a fim de garantir maior rigidez a edificação como um todo.

O edifício *Origine*, ao contrário dos demais, caracteriza-se como uma edificação mista em madeira, pois utiliza além do CLT, vigas e pilares internos em Madeira Laminada Colada

com a finalidade de atender as necessidades estruturais da edificação, conforme pode ser visualizado pela Figura 08.

É ainda importante ressaltar que é sabido que edificações em madeira, ainda que executados em madeira massiva, acabam por reduzir o peso da edificação se comparado a outras edificações massivas, como o concreto ou a alvenaria. Desta forma, Wood-Works (2018) relata que se este mesmo edifício fosse feito em concreto, seria possível construir apenas seis (6) pavimentos, devido à baixa capacidade de carga do solo do local de construção.

FIGURA 8 – ESQUEMA ESTRUTURAL DO EDIFÍCIO ORIGINE



Legenda de cores:

Roxo: painéis de CLT vertical

Azul: painéis de CLT vertical (para atender as forças de cisalhamento)

Caramelo: painéis de CLT horizontal

Verde: vigas em Madeira Laminada Colada

Amarela: pilares em Madeira Laminada Colada

FONTE: Adaptado de Wood-Works (2018).

## 2.8 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), ou *Life Cycle Assessment* (LCA), em inglês, é uma metodologia de estudo de avaliação dos impactos causados por determinados materiais, práticas ou processos ao meio ambiente. A ACV acontece de modo a quantificar os gastos



energéticos e emissões de um determinado ciclo do produto a partir da análise de todas as etapas de seu processo de constituição, assim, tem-se uma análise a partir do momento de sua extração até sua fase final, que seria o descarte ou o início do ciclo de reuso ou reciclagem. Neste sentido a ISO-14040 (ISO, 2006) cria diretrizes para o processo de inventário de Avaliação de Ciclo de Vida por empresas ou instituições interessadas em rastrear seus processos do ponto de vista ambiental.

Apesar de diversas iniciativas colocarem a ACV como uma metodologia adequada a medição de impactos ambientais e consequentemente para fins comparativos em relação ao impacto causado por um determinado produto em detrimento de seu processo de fabricação, no Brasil ainda não há um banco de dados com relação a catalogação e padronização da Avaliação de Ciclo de Vida dos materiais e, ainda mais, no processo de execução de um edifício. Neste sentido, o trabalho de Tavares (2006) é pioneiro em relação a iniciar um banco de dados nacional aplicado a materiais de construção tradicionalmente usado no Brasil e em relação aos processos de execução de uma edificação.

Diversos fabricantes têm rastreado seus processos de execução de produto, por meio de EPDs (*Environmental Products Declaration*), ou em tradução livre ao português, Declaração Ambiental de Produto. No entanto, no cenário nacional, ainda não é obrigatório que as empresas façam EPDs de seus produtos, sendo que apenas algumas empresas buscam o registro do ciclo de vida de seus produtos, muitas vezes incentivados por competir em cenários internacionais, uma vez que na Europa a elaboração das EPDs são uma obrigatoriedade no cenário de diversos setores produtivos (THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM, 2019).

No caso da construção civil, não apenas durante as fases de produção do material ou matéria prima que serão utilizados em obra, como também durante o processo de produção da edificação, seu uso e final de ciclo vida fazem parte da análise de impactos causados. Assim, diversas iniciativas têm se voltado a aplicação da ACV a fim de comparar práticas construtivas e mitigar os impactos ambientais causados pelo setor (HONDA, 2016).

Desta forma, em um cenário futuro, vislumbra-se que as ACVs, na forma de EPD dos materiais que compõe a edificação, estejam vinculadas aos materiais da construção civil, permitindo que ainda durante o projeto seja possível elaborar a Avaliação de Ciclo de Vida da edificação a partir do auxílio da plataforma BIM (HONDA, 2016).

Para que seja possível entender o que é Avaliação de Ciclo de Vida, é interessante que sejam entendidas suas fases, conforme ilustra o Quadro 02. Com relação a subdivisão, é possível que sejam percebidos três estágios no processo de Avaliação de Ciclo de Vida, sendo



eles a fase inicial ou pré-operacional, fase operacional e final do ciclo de vida ou pós-operacional.

QUADRO 4 – ESTÁGIOS DA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA DE UMA EDIFICAÇÃO

PRÉ-OPERACIONAL					OPERACIONAL					PÓS-OPERACIONAL				
PRODUÇÃO			CONSTRUÇÃO		ESTÁGIO DE USO					FINAL DE CICLO DE VIDA				ALÉM
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	D
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	TRANSPORTE	FABRICAÇÃO	TRANSPORTE	CONSTRUÇÃO/INTALAÇÃO	USO	MANUTENÇÃO	REPARO	SUBSTITUIÇÃO	REFORMA	DECONSTRUÇÃO/DEMOLIÇÃO	TRANSPORTE	PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS	DESCARTE	REUSO RECUPERAÇÃO RECICLAGEM
					B6	USO DE ENERGIA OPERACIONAL								
					B7	USO DE ÁGUA OPERACIONAL								

FONTE: Adaptado de BSI (2011).

A **fase inicial ou pré-operacional** é subdividida em fase de produção e construção. Esta subdivisão acontece devido a necessidade de distinguir os processos que acontecem até a chegada do material em obra e aqueles que acontecem posteriormente, durante os processos de execução ou montagem do edifício. Com isso, dentro da fase do material conhecida como **berço ao portão** (de A1 a A3), ou ainda em inglês, **cradle-to-gate** são analisados dados relativos as fases que vão da extração do material até sua saída de fábrica. Geralmente as EPD ocorrem para mapear esta etapa do processo, uma vez que ela compreende o escopo de trabalho do fabricante do material.

Na segunda etapa da fase inicial da ACV está a fase relativa aos processos de construção da edificação. Nesta etapa o transporte da fábrica até o canteiro de obras é contabilizado e todos os processos de montagem, execução de obra e desperdício de materiais são contabilizados (A4 - A5). A fase de construção, por ser relativa a um processo específico de construção de edifícios únicos, geralmente precisa ser contabilizada de maneira diferenciada, devido ao modo de construção de cada edifício ser único, bem como suas proporções na composição final, assim, ainda que haja processos mapeados com relação ao tempo para cada

atividade, esta fase precisa ser analisada com cautela, já que edifícios tem projetos e processos únicos.

A segunda fase é a **operacional**. Durante esta fase estão incluídas as atividades relativas aos processos de uso da edificação, sendo que esta fase é responsável pelo maior registro de gasto energético e emissão de dióxido de carbono pela edificação, ficando clara a necessidade de reduzir o consumo durante a operação da edificação. Desta forma, diversas iniciativas surgiram a fim de mitigar o consumo energético da fase operacional da edificação, bem como de criar fontes alternativas de energia a fim de que a edificação pudesse ter autossuficiência na produção de energia para seu consumo, tal como iniciativas como a da União Europeia para a criação de edificação de baixa emissão ou ainda edificação Net-Zero (D'AGOSTINHO, 2015).

Durante a fase operacional estão incluídos custos relativos ao uso (B1), manutenção (B2) e reparo (B3), substituição (B4) e reforma (B5), bem como o gasto operacional relativo as atividades humanas (B6), tais como iluminação, resfriamento e aquecimento, ventilação, utensílios e aquecimento de água. É importante ressaltar que a energia gasta para aquecimento e resfriamento está diretamente ligada aos materiais utilizados como vedação da edificação. Já as atividades relativas ao aquecimento de água, iluminação e utensílios estão mais relacionadas ao comportamento do usuário (DONG et al., 2019). Desta forma, deve partir dos projetistas a preocupação com a capacidade térmica das edificações.

E o **final de ciclo de vida ou fase pós-operacional** diz respeito a destinação final da edificação após sua desmontagem ou demolição. Esta fase passa a ser pensada de outra forma devido à preocupação com a geração de resíduos da construção civil, desta forma incorporando o cenário de final de ciclo de vida, por meio do estudo da economia circular, tendo como finalidade compreender os processos de descarte e converter estes processos em novos ciclos de reuso ou de reciclagem dos componentes e materiais da construção civil. Esta fase foi incorporada ao estudo da ACV e é nomeada como a fase **além (D)**, relativa aos processos de reuso, recuperação e reciclagem.

Por fim, é importante ressaltar que uma ACV que analisa a edificação do **berço ao túmulo** mapeia todos os ciclos da vida desta edificação e que a distribuição de consumo energética entre as três fases que a compõe, fase inicial, fase operacional e final de ciclo de vida, é de 20, 65 e 15%, respectivamente (BLENGINI E DI CARLO, 2010; EVANGELISTA et al., 2018; RAMESH; PRAKASH; SHUKLA, 2010).

### 2.8.1 Avaliação de Ciclo de Vida e BIM

O uso da plataforma BIM (*Building Information Modeling*) tem se difundido em projetos de edificações devido a sua capacidade de juntar as definições de um modelo virtual com gráficos e base de dados sobre os componentes e materiais que a compõe (SUCCAR, 2009).

Uma vez que softwares desenvolvidos em plataforma BIM permitem incluir informações relativas aos materiais e métodos construtivos, é possível inferir que esta plataforma é capaz de ajudar no desenvolvimento mais sustentável de edificações.

Outra contribuição da incorporação de ACVs na plataforma BIM é a simplificação do método, redução do tempo de análise e, principalmente, a capacidade em auxiliar projetistas na tomada de decisões ainda durante as primeiras fases de projeto, por meio da seleção de materiais e técnicas construtivas, gerenciamento do canteiro de obras e da análise dos sistemas que compõe a edificação. É possível ainda melhorar o desempenho da edificação, integrando e otimizando todas as fases do ciclo de vida ainda durante o projeto.

Como a Avaliação de Ciclo de Vida é considerada um método completo de avaliação de gasto energético, é notável o interesse em a integrar em BIM. A integração entre BIM e ACV pode ser um meio de reduzir e otimizar o processo de Avaliação de Ciclo de Vida. Todavia, diversos estudos, conforme revisão feita por Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez (2017), apontam a importância em simplificar a ACV de edificações durante as fases iniciais de projeto a fim de garantir que esta metodologia seja adotada como critério para a tomada de decisão quanto a escolha de materiais, técnicas construtivas, dentre outros. O estudo ainda aponta o potencial do BIM em reduzir o impacto ambiental causado pelo setor da construção civil, isto ocorre devido a rastreabilidade de processos e ao maior controle e automação nos processos da construção civil. Visto a necessidade de simplificar a ACV para tornar mais fácil a análise ainda durante o projeto, sendo estabelecidas três categorias de estudo de ACV: ACV de triagem, ACV simplificada e ACV completa.

As fases analisadas por uma ACV variam de acordo com o escopo e objetivos da análise. Além disso, existem limitações no sistema e na base de dados a ser utilizada que podem gerar diferenças no resultado final da ACV.

Para que haja integração entre ACV e BIM, a literatura técnica aponta a necessidade de simplificar a análise, simplificar as características geométricas do modelo e, finalmente, simplificar as fórmulas para dentro do sistema. Com isso, pode-se obter uma ACV simplificada

da edificação, ou ainda uma ACV parcial, que é caracterizada por não contemplar todas as fases do ciclo de vida da edificação.

Diversos estudos, conforme Soust-Verdaguer, Llatas e García-Martínez (2017), apontam que um importante progresso da integração BIM - ACV é a facilitação em gerar planilhas quantitativas de materiais empregados na edificação. Todavia, Peng (2014) reconhece que o desenvolvimento de métodos de ACV baseado em BIM ainda são limitados devido ao tempo e a suposição da produção e demolição dos materiais. Ele destaca que estas suposições são baseadas em estudos, dados de empreiteiros e medições locais, trazendo assim evidências da dificuldade em incluir diversas fases no ciclo de vida da edificação dentro de plataforma BIM.

Todavia, o desenvolvimento de novos softwares e plugins integrados a plataforma BIM vem de encontro a auxiliar na tomada de decisão e na decisão com relação aos impactos, emissões e consumo energético da edificação, neste sentido, a variedade de plugins e softwares que surgiram ou que criaram sistemas de interoperabilidade com a plataforma BIM tem crescido progressivamente, mesmo que este ainda seja um mercado a ser desenvolvido e aprimorado dentro do setor de projetos para a construção civil.

Dentre eles estão o *Tally* (2019) e o *One Click LCA* (2019) para a simulação de Avaliação de Ciclo de Vida como plugins integrados a plataforma BIM. Também o *Green Building Studio* (2019), *Ladybugy* (2019), *Insight* (2019) e *Wufi* (2019), são opções de softwares e plugins para a simulação de desempenho da edificação compatíveis com BIM.

Ainda que seja necessário simplificar o método para possibilitar a integração BIM-ACV, o método integrado mostra-se como uma interessante ferramenta para trabalhos posteriores e um campo de pesquisa com grande potencial a ser explorado, tornando a Avaliação de Ciclo de Vida mais acessível aos projetistas e aos usuários finais em edificações projetadas em BIM. A contribuição acontece por conta de auxiliar durante a tomada de decisões de projeto e ainda contribui para que melhores escolhas na construção civil sejam tomadas embasadas no impacto ambiental gerado pelo edifício.

Com relação a tomada de decisão de materiais e técnicas construtivas e a incorporação do uso de painéis de CLT ao projeto de edificações, pode carecer dos profissionais uma diferente lógica projetual e construtiva, uma vez que o projeto precisa ser delineado a partir da interação de painéis verticais e horizontais e de suas espessuras. Neste sentido, o processo de concepção projetual em BIM pode auxiliar durante o desenvolvimento destes projetos, já que alia o modelo as informações relativas aos componentes de projeto (SUCCAR, 2009), no

entanto a construção de um banco de componentes e de dados de painéis de CLT ainda são um desafio para o mercado fornecedor (WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018).

## 2.9 ESTADO DA ARTE: PESQUISA DE ACV DE EDIFÍCIO EM CLT

Estudos comparativos entre edificações de mesmas características e que utilizam diferentes materiais de construção em seus processos construtivos são um estudo recorrente na pesquisa científica. A finalidade destas pesquisas é a de comparar quais as melhores alternativas de materiais e técnicas construtivas aplicadas à edificação.

As pesquisas comparativas mais recorrentes comparam edificações constituídas principalmente por concreto, blocos de cerâmica ou de concreto com construções leves, tais como *steel frame* ou *wood frame*. O CLT, ainda que tenha surgido há cerca de 30 anos no mercado, vem sendo objeto de estudo por diversos autores a fim de criar uma base de dados comparativa em relação ao seu uso em edificações como vedação e estrutura. Neste sentido, é importante compreender o comportamento deste material em relação a outros, quando aplicado a edificações verticais.

Neste sentido, em uma análise bibliométrica da literatura acerca dos estudos comparativos do CLT a outras técnicas construtivas por meio do uso de ACV, com o uso das palavras “CLT”, “Cross-Laminated Timber” e “LCA”, em bases de dados, foram encontrados, após seleção, 15 artigos dentre os anos 2014 e agosto de 2018 que fazem ACV de edificações em CLT. Estes artigos e as características dos modelos utilizados para a pesquisa são analisados nos Gráficos 03 e 04.

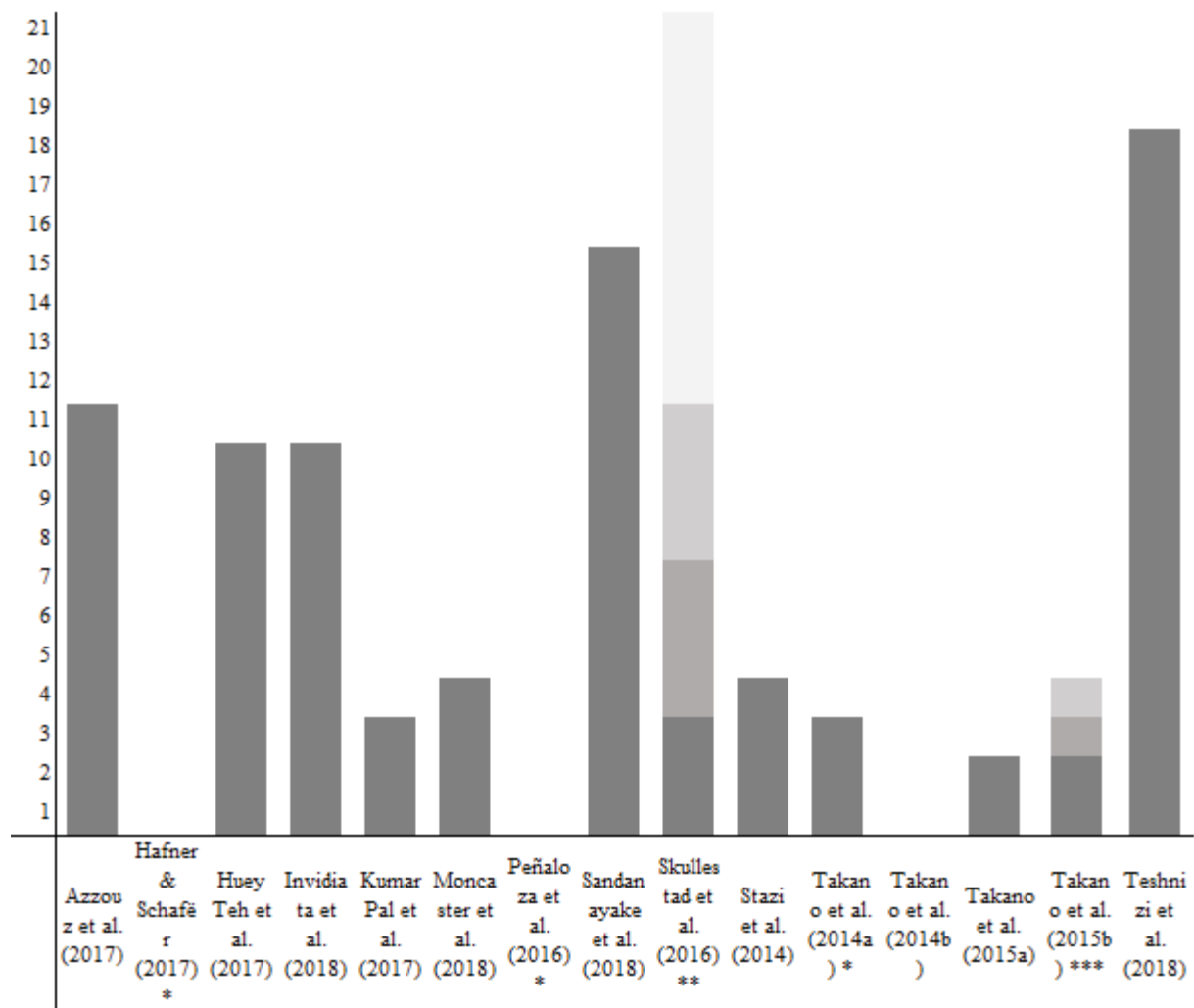
Por meio da análise destes trabalhos é possível verificar que existe o interesse no meio acadêmico pelo tema. Conforme Mallo e Espinoza (2015), existe o consenso de que se a madeira utilizada para fins construtivos é proveniente de floresta de manejo sustentável, é possível considerar que estas são um repositório de carbono.

A Avaliação de Ciclo de Vida da estrutura da edificação se destaca como um importante elemento a ser estudado (BSI, 2011), uma vez que representa 10% do Potencial de Aquecimento Global (GWP) e 7% das emissões de carbono de combustíveis fósseis, enquanto o restante do envelope representa de 2% a 3% deste total (SKULLESTAD; BOHNE; LOHNE, 2016).

Do Gráfico 03 é possível inferir que não há um padrão de altura das edificações analisadas pelos artigos analisados, no entanto, existe a tendência de que o CLT seja comparado a outras técnicas construtivas em edificações verticais, seja elas de quatro (4) até vinte e um

(21) pavimentos e ainda a comparação do uso de diferentes materiais aplicados a edificações em diferentes alturas ou ainda em diferentes tipologias construtivas.

GRÁFICO 3 – ALTURA DAS EDIFICAÇÕES COMPARADAS



\* Diferentes unidades de base (como pode ser visto a partir da Tabela 01)

\*\* analisou quatro diferentes alturas (4, 7, 12 e 21 pavimentos)

\*\*\* analisou quatro diferentes tipologias (casa unifamiliar, casa geminada, casa urbana e bloco de apartamentos)

FONTE: A autora (2018) com base nos artigos analisados.

Já a partir do Gráfico 04 é possível visualizar que a escolha de materiais construtivos para a comparação varia de caso a caso a partir do contexto local da pesquisa. Também a fundação não é analisada na maior parte dos estudos, sendo que em alguns deles se ressalva que apesar de não analisada é sabido que o uso de CLT como estrutura reduz as demandas da fundação, e ainda em alguns casos onde o térreo é constituído por outro material, também este pavimento não é analisado, como é o caso de Stazi et al. (2014).

Neste sentido, estes estudos indicam que materiais de madeira engenheirada estão se tornando mais populares e que eles aparecem como uma alternativa ao concreto por conta de suas vantagens construtivas, custo mais competitivo e redução de gasto energético. Não apenas a academia, como também arquitetos, engenheiros e construtores concordam que a madeira engenheirada, principalmente para edificações de médio porte, é uma alternativa viável (ASSIF et al., 2007; BUCHANAN et al., 2008; IP; MILLER, 2012, SANDANAYAKE et al., 2018).

LWT (1)	0														0	0	0	0
Aumento de Bio (2)	0																	
Alvenaria e Tijolos	0				0				0									
Wood Frame	0																	
Aço					0				0									
Steel Frame	0				0					0			0	0				
Painéis de Concreto e Outros	0	0	0		0					0	0		0	0				
Concreto Armado	0	0	0	0		0	0	0	0					0				
Madeira-aço	0																	
Madeira-Cimento										0								
Híbrido de	0								0					0				
CLT (4)	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0				
	Azzouz et al. (2017)	Hafner & Schäfer (2017)	Huey Teh et al. (2017)	Invidiata et al. (2018)	Kumar Pal et al. (2017)	Moncaster et al. (2018)	Peñaloza et al. (2016)	Sandanyake et al. (2018)	Skullestad et al. (2016)	Stazi et al. (2014)	Takano et al. (2014a)	Takano et al. (2014b)	Takano et al. (2015a)	Takano et al. (2015b)	Teshnizi et al. (2018)			

(4) Cross-laminated Timber ou Madeira Laminada Colada Cruzada



FONTE: A autora (2018) com base nos artigos analisados.

### 2.9.1 Critérios ambientais

Muita atenção tem sido dada para novas formas de construir, e com isso o foco tem sido na eficiência energética e captação de energias renováveis. Neste sentido, existe uma crescente consciência de que os impactos dos produtos da construção e especialmente o carbono embutido estão se tornando mais importantes (KOVACIC et al., 2019), uma vez que, se reduzidas as emissões durante a fase operacional, a energia incorporada a edificação passa a ter papel crucial na ACV.

Assim, para empreiteiros e projetistas que querem ter práticas de construção sustentáveis, a fase de construção torna-se uma etapa crítica do ciclo de vida da edificação (SANDANAYAKE, 2016). Conforme pode ser inferido da Tabela 04, o critério ambiental mais analisado é a emissão de dióxido de carbono, ainda que este apareça em alguns estudos de outras formas e incorporado a outros critérios ambientais, tais como “Emissões de GHG”, “Pegada de Carbono”, dentre outros.

No entanto, a fase de construção ainda se torna crítica e relevante em ACVs globais, conforme afirma Stazi et al. (2014). Mesmo para o CLT, uma solução de construção seca, esta fase é crítica, já que a demanda por matéria prima é alta.

O estudo de Stazi et al. (2014) pontua o desempenho inferior do CLT com relação ao desempenho térmico, porém, devido a menor demanda energética em outras fases, o sistema em CLT, se comparado a outros materiais, reduz a demanda de energia da edificação ao longo de todo o ciclo de vida.

A análise de custo também aparece nos estudos, mas sempre como um critério complementar, devido ao potencial de inovação e desconhecimento parcial do mercado pelo produto. Apesar de diversos critérios serem analisados ao longo dos artigos, tais como depleção de ozônio ( $\text{kg CFC eq./m}^2$ ), potencial de acidificação ( $\text{kg SO}_4 \text{ eq./m}^2$ ), potencial de depleção de combustíveis fósseis ( $\text{MJ surplus/m}^2$ ), dentre outros, os critérios mais avaliados são emissão de GHG, emissão de carbono, consumo energético e custo – LCC (*Life Cycle Cost*). Entretanto, a decisão de uso do material deve ser feita não apenas com base no seu desempenho ambiental, mas é ainda importante perceber as características do mesmo de forma holística.

É ainda possível destacar que edificações em CLT são similares, ou ainda melhores que construções em concreto e aço, não apenas em relação aos impactos ambientais, mas ainda em aspectos de construtibilidade, resistência ao fogo, acústica e capacidade térmica

(STAUDER, 2013). No entanto, as práticas de extração da madeira devem ser observadas a fim de concluir se estas são benéficas ou não para o meio ambiente.

TABELA 4 – CARACTERÍSTICAS DOS ESTUDOS DE ACV ANALISADOS DE EDIFICAÇÕES EM CLT

Autor	País da pesquisa	Unidade funcional	Tipologia construtiva	Ciclo de vida	Base de Dados	Critérios de avaliação ambiental
Azzouz et al. (2017)	Reino Unido	Edificação completa/ estrutura	Edifício corporativo	60 anos	BRE- GreenGuide Book (2015)	Potencial de Aquecimento Global (CO <sub>2</sub> -eq.), Depleção de Combustíveis Fósseis (MJ)
Hafner & Schafär (2017)	Alemanha e Áustria	1 m <sup>2</sup>	1 m <sup>2</sup> equivalente dos materiais utilizados- edificação residencial	50 anos	Base de dados alinhada com a EN 15978:2012	Potencial de Aquecimento Global (CO <sub>2</sub> -eq.)
Huey Teh et al. (2017)	Austrália	Edificação completa	Residencial e não residencial	não informa do	Eora	Pegada de Carbono (Mt CO <sub>2</sub> -eq.)
Invidiata et al. (2017)	Itália	Edificação completa	Habitação social multifamiliar	100 anos	ICE, Ecoinvent 3 e certificações de EPD, câmara de comércio de Milão	Notas de Consumo (n), Demanda de Energia Primária (LCEA- in MWh), Emissão de Dióxido de Carbono (LCCO <sub>2</sub> A- in TCO <sub>2</sub> E), Custo (LCCA), Tomada de Decisão Multi-Critério (LCCMA)
Kumar Pal et al. (2017)	Finlândia	Edificação completa/ estrutura	Casa urbana	50 anos	Ecoinvent, Estatísticas finlandesas	Energia de Ciclo de Vida e Custo de Ciclo de Vida
Moncaster et al. (2018)	Reino Unido	Edificação completa/ estrutura	Residência estudantil	não informa do	Bath/BSRIA Inventário de Carbono e Energia	Potencial de Aquecimento Global (CO <sub>2</sub> -eq.)
Peñaloza et al. (2016)	Suécia	Edificação completa	Bloco de apartamento de residência familiar de baixa emissão energética	50 e 70 anos	Ecoinvent com ajustes na base de dados para fabricação dos materiais e processos anteriores para que sejam representativos em relação a indústria sueca.	GWP100 (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> por área habitável)
Sandanayake et al. (2018)	Austrália	Edificação completa, m <sup>2</sup>	Residencial e comercial	não informa do	Alcorn (2003) e AGGA (2013) ***	Emissões de GHG
Skullestad et al. (2016)	Noruega	Estrutura, m <sup>2</sup>	Estrutura	60 anos	Ecoinvent v.3.2 , EPDs, informação de outros estudos de fabricação	Potencial de Mudança Climática (CC)
Stazi et al. (2014)	Itália	Edificação completa	Residência familiar de baixa emissão energética	75 anos	Ecoinvent, distâncias de transporte, EnergyPlus simulação de aquecimento e resfriamento	Impactos Ambientais; Demanda de Energia. Custo Ambiental; Emissão de Dióxido de Carbono
Takano et al. (2014a)	Finlândia	Edificação completa/ estrutura	Casa urbana	não informa do	Ecoinvent e literatura	Uso de Recursos (RU), Energia Embutida (EE), Conteúdo Energético (EC), Emissão de Gases de Efeito Estufa Incorporados (GHG), Estoque de Carbono (CS), Custo dos Materiais (cost)
Takano et al. (2014b)	Finlândia	Edificação completa	Pequeno edifício na forma de caixa (10,14m <sup>2</sup> )	materia is	Gabi 6, Ecoinvent V3.0, IBO (Austrália), CFP (Japão), Synergia (Finlândia)	Emissões de GHG
Takano et al. (2015a)	Finlândia	Edificação completa/ estrutura	Casa isolada	50 anos	Ecoinvent, IDA ICE	MJ/kg de produto ou MJ/MJ de energia final
Takano et al. (2015b)	Finlândia	Edificação completa/ estrutura	casa unifamiliar, casa geminada, casa urbana e bloco de apartamentos	50 anos	Ecoinvent, IDA ICE	MJ/kg de produto ou MJ/MJ de energia final
Teshnizi et al. (2018)	Canadá	1 m <sup>2</sup>	Residência estudantil	100 anos	Athena	Potencial de Aquecimento Global (kg CO <sub>2</sub> eq./m <sup>2</sup> ), Deposição de Ozônio (kg CFC eq./m <sup>2</sup> ), Potencial de Acidificação (kg SO <sub>4</sub> eq./m <sup>2</sup> ), Potencial de Eutrofização (kg N eq./m <sup>2</sup> ), Potencial de Fumaça (kg O <sub>3</sub> eq./m <sup>2</sup> ), Potencial de Depleção de Combustíveis Fósseis (MJ surplus/m <sup>2</sup> ), ACVC (Life Cost Cycle)

FONTE: A autora (2018) com base nos artigos analisados.

### 2.9.2 ACV: base de dados, fases avaliadas e resultados

Portanto, entender as características dos materiais pode certamente afetar as decisões de projeto. Em adição a isso, o autor conclui que é importante notar que a variação de custo dos materiais deve ser aquela que tem menor peso em comparação com os demais indicadores. Uma interpretação mais ampla é importante, especialmente para os materiais de madeira, por conta de suas propriedades inerentes, tais como o conteúdo energético e o armazenamento de carbono.

Como é sabido, a base de dados é de suma importância para a determinação do método da ACV e para os resultados do estudo, uma vez que cada base de dados tem diferentes métodos e critérios, relativos aos processos de um determinado local ou é baseado em métodos que permitem a avaliação global do produto (BSI, 2011). Como analisado por Takano et al. (2014b), a comparação direta de bases de dados é discutível, uma vez que elas são feitas de diferentes maneiras e surgem a partir de diferentes propostas.

Dentre os artigos analisados, suas características variam muito, desde a tipologia, país, fases analisadas, critérios de avaliação e materiais comparados. Assim, o uso de bases de dados diferentes também faz com que seus resultados não possam ser diretamente comparados, mas sim, de modo qualitativo, assim como é pontuado por Wittstock et al. (2013). Takano et al. (2014b) discute que, já que as edificações são unidades complexas de análise, a escolha da base de dados correta passa a ser um pré-requisito.

Conforme a Tabela 04, é possível inferir que dentre os artigos analisados, a base de dados mais utilizada é o *Ecoinvent*, sendo que esta é uma das bases de dados mais completas para o setor da construção civil. Todavia, as fases analisadas variam de estudo para estudo.

Moncaster et al. (2018) fez uma revisão sobre as principais fases analisadas em ACVs de edificações, concluindo que é mais comum calcular as fases de berço ao portão (*cradle-to-gate*). Já as fases de transporte e construção são as próximas fases mais comumente estudadas, seguidas pelo final do ciclo de vida e além, enquanto a fase de uso, que inclui uso, manutenção, reparos, substituição, remodelação e gasto de energia para operação é a mais omitida pelos estudos. Todavia, a partir da análise do Gráfico 05 é possível inferir que a fase de operação aparece em diversos estudos, apesar de e, apenas alguns estudos toda a fase de operação ser calculada, a energia operacional (B6) ser a mais estudada, e o uso operacional da água (B7) não ser analisado por nenhum estudo.

Todavia, a fase mais estudada a partir da revisão dos artigos foi a fase pré-operacional (A1- A5), sendo que em alguns estudos a fase de transporte (A4) e construção (A5) não

aparecem na ACV (SKULLESTAD; BOHNE; LOHNE, 2016. TAKANO et al., 2015a. HUEY TEH et al., 2017), conforme mostra o Gráfico 05.

Apesar das diferenças com relação as fases analisadas e as bases de dados, é possível encontrar semelhanças com relação a emissão de carbono em diversos estudos, já com relação aos outros critérios de avaliação, os resultados podem diferir entre si. No entanto, ainda não há um consenso dos profissionais de ACV com relação a resposta aos aspectos dinâmicos relacionados aos impactos e sequestro de carbono proveniente de materiais primas de base biológica (ROYNE et al., 2016), o que acaba por deixar estas questões relativas ao sequestro e compensações nas emissões de dióxido de carbono plausíveis para análise individualizada.

Para Takano et al. (2015a), a estrutura é a que tem maior influência durante a fase pré-operacional do ciclo de vida. Com relação a comparação entre materiais, o CLT é o maior consumidor de energia na fase pré-operacional, no entanto é o que tem maiores benefícios com relação a reciclagem de matérias. Ao se fazer um balanço geral, o CLT mostra-se como a melhor opção, tendo o menor consumo energético e relativamente alta energia recuperada. No entanto, para a base de dados de balanço energético de ciclo de vida, LWT e CLT são considerados muito parecidos. Durante a fase pós-operacional da edificação, os materiais mais pesados, como tijolos e concreto tendem a ter um desempenho pior do que aqueles materiais considerados leves, como o LWT, o CLT e o aço.

De acordo com Peñaloza, Erlandsson e Falk (2016), edificações com produtos de base biológica tendem a ter menores impactos climáticos em todo seu ciclo de vida quando o sequestro de carbono é contabilizado. O estudo ainda mostra que os resultados podem ser muito diferentes de acordo com a suposição de o sequestro de carbono ocorrer antes ou depois da manufatura do material, com relação ao tempo de vida útil da edificação e ao cenário de fim de vida.

Neste sentido, os autores ainda afirmam que materiais de base biológica tendem a ter menor impacto que aqueles de fontes minerais, no entanto, isto acontece apenas se o sequestro de carbono for levado em consideração. Já para o cenário de final de vida, os materiais de base biológica diferem daqueles de bases não biológicas, isto vai de acordo com a destinação final do produto, reuso, reciclagem e o tempo entre o sequestro do carbono e sua emissão (PEÑALOZA; ERLANDSSON; FALK, 2016).

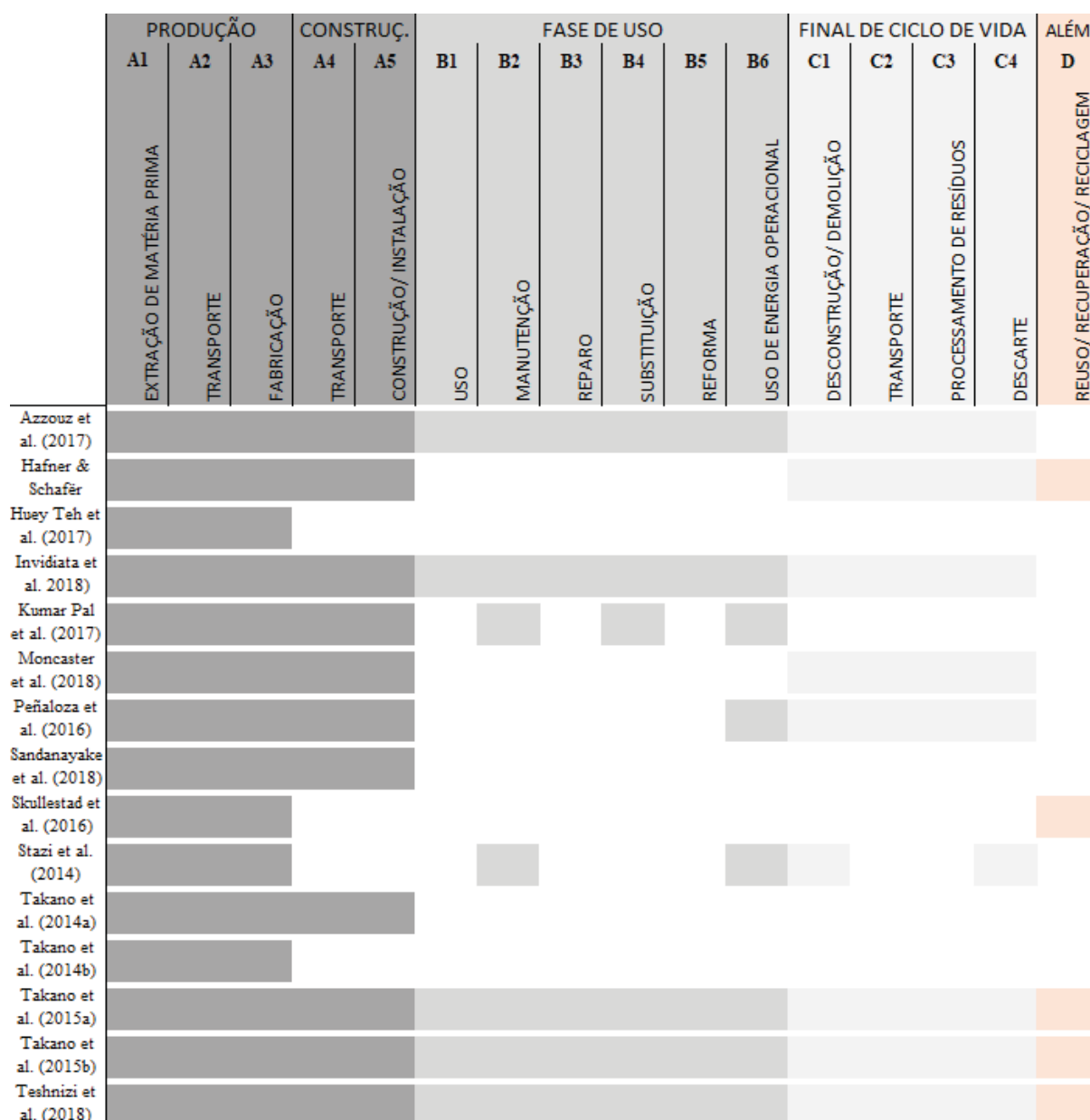
Para Invidiata, Lavagna e Ghisi (2018) o uso de CLT tem melhor performance que o concreto com relação ao carbono emitido, no entanto seu custo ainda é mais alto, apesar de pontuar que o uso de diferentes bases de dados é capaz de criar até 30% de diferença no resultado.

Azzouz et al. (2017) conclui que enquanto a estratégia de usar CLT-aço reduz o carbono em 3,1%, durante o ciclo de vida, o uso desta combinação de materiais aumenta em 0,6% o consumo energético, devido aos gastos com pressurização dos painéis de madeira e de colagem.

Para Skullestad, Bohne e Lohne (2016), o uso de madeira, em comparação ao concreto e aço, reduz os impactos climáticos do setor da construção civil, uma vez assumidos critérios de sustentabilidade na retirada das árvores. O estudo ainda conclui que quanto mais alto o edifício, menor o impacto absoluto nas mudanças climáticas, sendo que a redução maior ocorre de 3 para 12 pavimentos. Já de 12 para 21 pavimentos, a redução de impacto é menor, mas ainda existente. Ainda ao analisar o cenário de final de ciclo de vida, os autores concluem que se 90% dos resíduos de madeira forem queimados com aproveitamento do calor gerado, as consequências para o meio ambiente são negativas.

O objetivo de Hafner e Schafer (2017) era descrever um método de substituição realista de materiais minerais pela madeira. O estudo mostra uma variação de resultados de acordo com a tipologia e tamanho da edificação, sendo que, para pequenas residências, o potencial de redução varia de 35% chegando a 56%. Já para edificações em altura, as reduções podem variar de 9% a 48%, sendo os requisitos de segurança ao fogo e acústica os principais causadores de alterações entre tipologias construtivas. Para o final do ciclo de vida, suas conclusões diferem daquelas demonstradas por Skullestad, Bohne e Lohne (2016), já que em seu cenário, quanto maior a quantidade de madeira, maiores os benefícios de seu uso.

GRÁFICO 5 – FASES DO CICLO DE VIDA AVALIADOS PELOS ESTUDOS



FONTE: A autora (2018) com base nos artigos analisados.

Em um cenário otimista desenvolvido na Austrália, Huey Teh et al. (2017) concluiu que se todas as novas edificações residenciais do país fossem feitas em madeira, ao invés de concreto, 26 Mt CO<sub>2</sub> poderiam ser armazenados até 2050, e se o sequestro de carbono for considerado, a redução das emissões chega a 119 Mt CO<sub>2e</sub>. Ainda conclui que para as edificações comerciais da Austrália, um ganho de 13 Mt CO<sub>2</sub> seria conseguido, e em um cenário de consideração de sequestro de carbono, 28 Mt CO<sub>2</sub> seriam conseguidos.

Teshnizi et al. (2018) faz uma ACV de duas edificações recentemente concluídas na Universidade da Columbia Britânica, sendo uma delas, a *Ponderosa Commons Ceddar House*

em uma estrutura em concreto e a *Brock Commons Tallwood House* feita em uma estrutura híbrida de madeira maciça. Ambas servem como moradias universitárias, e tem um projeto base bastante similar, portanto, é possível criar uma ACV comparativa entre as edificações.

O *Brock Commons* tem 15.115 m<sup>2</sup> e conta com 18 pavimentos. Sua estrutura é híbrida, sendo a fundação, o térreo, a laje do primeiro piso e a caixa de elevadores e escadas feitos em concreto. Enquanto isso, a estrutura é fabricada com CLT, os pisos são suportados por vigas de Madeira Laminada Colada e colunas de PSL (Parallel Strand Lumber) com conexões em aço e laje de aço. Já a *Ponderosa Commons* conta com 12.838 m<sup>2</sup>, distribuídos em 18 pavimentos mais base. A fundação e base, bem como caixa de elevadores e escadas feitos em concreto armado, a estrutura é em concreto armado, tanto lajes como vigas e pilares.

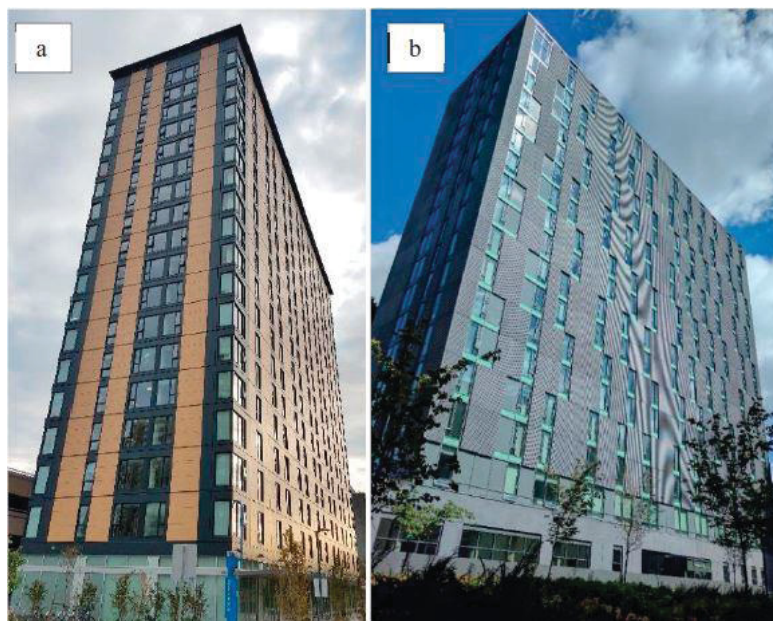
A ACV foi feita com a base de dados *Athena* e compreende as etapas do berço ao túmulo da edificação com vida útil de 100 anos, sendo feitas uma ACV completa e ACVC para esse estudo. Este estudo faz parte de uma iniciativa da Universidade da Columbia Britânica em utilizar projetos-chave do campus para fornecer estudos de caso para o avanço da prática de sustentabilidade através da demonstração de inovação e de lições aprendidas.

Os resultados mostram que os custos da edificação híbrida em madeira foram 11% superiores aos em concreto, mas isso também é colocado como uma diferença devido a inovação do material e ele ainda não estar tão facilmente disponível no mercado quanto os materiais mais tradicionais, conforme usados na segunda edificação. Já para a ACV, a *Tallwood House* tem um melhor desempenho em todas as categorias de impacto, conforme a figura 09 A e 09 B, incluindo o potencial de aquecimento global, onde ela tem 25% menos impacto negativo do que a *Pnderosa Commons*.

Ainda em relação a estudo que comparam o CLT a outros materiais da construção civil, Robertson et al. (2012) conduziu uma ACV comparando dois edifícios comerciais de cinco pavimentos, um em concreto e a outro em CLT. A conclusão de sua pesquisa foi de que a edificação em CLT consumiu 15% menos energia se comparada com o concreto.



FIGURA 9 A E 9 B – TORRES DE RESIDÊNCIAS DE ALUNOS DA UBC (A) BROCK COMMONS  
TALLWOOD HOUSE (B) PONDEROSA COMMONS CEDAR HOUSE



FONTE: Teshnizi et al. (2018).

Já Chen (2012) calculou a energia operacional (aquecimento, ventilação e condicionamento de ar, iluminação e utensílios) de uma edificação de escritórios de cinco pavimentos de CLT e outra de concreto. Sua pesquisa concluiu que a edificação em CLT consumiu 10% menos energia operacional. Segundo seus cálculos, com esta economia ele sugere que seria possível melhorar a tecnologia para operação do edifício e otimizar seu design.

John et al. (2009) indica que o CLT provoca uma redução de impactos ao meio ambiente em diversas categorias, tais como depleção de ozônio, potencial de aquecimento solar e eutrofização. O estudo também concluiu que se forem somados o total de carbono que a madeira empregada na fabricação do CLT faz, seria possível operar o edifício por cerca de 12 anos sendo que as suas emissões de carbono desta fase seriam compensadas pelo carbono sequestrado pelas árvores que foram cortadas para a produção do edifício.

Já a pesquisa feita por Hammond e Jones (2008), no Reino Unido mostrou que uma edificação em concreto e outra em aço emitem praticamente a mesma quantidade de gás carbônico para sua produção. Enquanto isso, conforme simulação, uma edificação equivalente em CLT produziria menos da metade deste valor. No entanto, se o sequestro de carbono for levado em consideração em edificações em CLT, é possível concluir que elas se tornam depósitos de carbono, sendo esta também uma conclusão dos estudos de Atlee (2011), Salazar e Meil (2012) e Wang, Toppinen e Juslin (2013).

Além destas pesquisas que concluem que o CLT tem um melhor desempenho ambiental se comparado a outros materiais de construção como o concreto e o aço, também é possível destacar a capacidade do CLT em utilizar madeira que seria descartada por conta de sua baixa resistência ou falta de qualidade para utilização por materiais de maior valor agregado que sejam derivados da madeira.

Conforme cita Mallo e Espinoza (2015), isto ocorre devido ao fato que o CLT é feito com pequenos componentes de madeira, podendo ter dimensões mínimas de 5x15cm, e que, portanto, a qualidade das partes individuais não é tão crítica quanto em outros produtos feitos em madeira. O CLT apresenta a capacidade de utilizar material de menor valor, tal como madeira atacada por insetos, mas que não esteja afetada mecanicamente.

Para concluir, é importante entender que a escolha de materiais construtivos no balanço energético do ciclo de vida de um edifício é uma questão complexa e que é bastante difícil chegar a um consenso sobre valores absolutos de gasto energético entre materiais. Apesar dos estudos de caso acima apresentados nos levarem a uma visão panorâmica de que o CLT é interessante a partir de uma abordagem da ACV de edificação, é importante que cada caso seja estudado em suas particularidades.

Outra oportunidade dentro desta pesquisa é a integração entre ferramentas de base de dados de ACV e plataformas de projeto de edificações em BIM, devido a sua capacidade em integrar estes dados relativos aos gastos energéticos ainda durante as fases iniciais de projeto, auxiliando os projetistas nas tomadas de decisão quanto aos impactos gerados por cada escolha que eles fazem para o projeto.

Por fim, é possível concluir a partir da análise dos artigos, que o CLT utilizado para a construção pode diminuir a energia embutida, GHG e CO<sub>2</sub>, conforme afirma Huey Teh et al. (2017). No entanto, para a tomada de decisão quanto ao uso do CLT aplicado às edificações, outros critérios de decisão, tais como o custo e a aceitação do material, devem ser levados em consideração.

### 3 ESTRATÉGIA DE PESQUISA

Este capítulo descreve o método que será utilizado para esta pesquisa, um estudo de caso comparativo, bem como as estratégias utilizadas para o desenvolvimento do trabalho e as etapas que o compõe.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DE ESTRATÉGIA DE PESQUISA

O método científico aplicado a esta pesquisa é o indutivo, já que reúne partes isoladas da literatura dentro de um único conjunto (MARCONI E LAKATOS, 2010), neste caso, de modo a reunir informações acerca do impacto ambiental de edificações em CLT comparada a outras técnicas construtivas.

Esta pesquisa é de natureza aplicada, uma vez que aplica conhecimentos e permite auxiliar profissionais ao longo da tomada de decisão. No entanto, a pesquisa tem objetivo exploratório, uma vez que o campo de estudo relacionado ao tema abordado ainda carece da criação de conhecimento técnico científico, para que assim se possa compreender melhor um determinado problema.

Desta forma, a coleta de dados foi feita por meio de levantamento bibliográfico e documental, o que inclui livros, artigos, dissertações, teses, normas técnicas nacionais e internacionais, sites de notícias e catálogo de fabricantes. Com base nesta coleta de dados foi elaborada a revisão bibliográfica do tema e serão modelados e quantificados os componentes do modelo a ser avaliado pela ACV.

A estratégia de pesquisa é um estudo comparativo, por este fato esse projeto possui características flexíveis, uma vez que avalia um modelo de projeto construtivo em BIM, com diferentes materiais a partir de critérios ambientais similares. Portanto, a pesquisa a seguir pode ser caracterizada como de abordagem quantitativa, uma vez que, a partir de um modelo em BIM serão feitas a simulação do gasto energético e emissões de dióxido de carbono para a produção de painéis em CLT em seu uso aplicado à uma edificação vertical. Nesta etapa será feita a simulação de um edifício vertical que compare o CLT a outras técnicas construtivas.

O estudo de caso irá comparar o gasto energético da edificação em madeira (CLT) àquela em concreto moldado *in loco* e vedação em alvenaria de bloco cerâmico e a outro modelo que utiliza a técnica de blocos de concreto estruturais para execução da obra. As fases a serem analisadas são a fase pré-operacional nas fases compreendidas dentre o berço até o canteiro de obras (A1 - A4), sem estar incluída a construção ou montagem da edificação (A5), fase

operacional que compreende o as trocas e manutenções à edificação ao longo de seu período operacional (B2 - B5) e a fase pós-operacional (C2 – C4), além da fase de demolição (C1) e destinação final dos materiais (D).

Outra parte importante dentro do ciclo de vida da edificação será analisado, que é a fase operacional da edificação para os três modelos propostos (CLT; concreto armado e bloco cerâmico; e bloco de concreto estrutural), que é o período compreendido como fase operacional da edificação (B6), sendo esta elaborada também em BIM, porém não integrada à ACV.

A finalidade deste estudo comparativo por meio de simulação computacional é confrontar o gasto energético e emissão de dióxido de carbono relativo ao processo de produção do edifício e o desempenho térmico do edifício para o CLT e para a alvenaria convencional, comumente utilizada no Brasil, por meio do uso de ferramentas integradas ao BIM, a fim de avaliar a facilidade de elaboração e a capacidade do BIM em auxiliar os profissionais na escolha de materiais durante o projeto.

QUADRO 5 – CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

MÉTODO CIENTÍFICO:	OBJETIVO:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Indutivo</li> <li>• Dedutivo</li> <li>• Hipotético-dedutivo</li> <li>• <u>Abdutivo</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Exploratória</li> <li>• Descritiva</li> <li>• Explicativa</li> </ul>
NATUREZA:	ABORDAGEM:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicada</li> <li>• Básica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitativa</li> <li>• Quantitativa</li> </ul>
TÉCNICA DE COLETA DE DADOS:	PROCEDIMENTO TÉCNICO:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bibliográfica</li> <li>• Documental</li> <li>• Grupo focal</li> <li>• Questionários</li> <li>• Observação direta</li> <li>• Entrevistas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudo de caso</li> <li>• Pesquisa-ação</li> <li>• Survey</li> <li>• Modelagem</li> <li>• Design Science Research</li> </ul>

FONTE: A autora com base em Gil (2009); Dresch, Lacerda e Júnior (2015).

### 3.1.1 Justificativa da escolha a partir do objetivo

Uma vez que o viés desta pesquisa é o ambiental, se faz necessário analisar dados relativos ao impacto ambiental de edifícios construídos com esta técnica construtiva e os comparar a edifícios similares, mas que sejam executados com outra técnica de construção

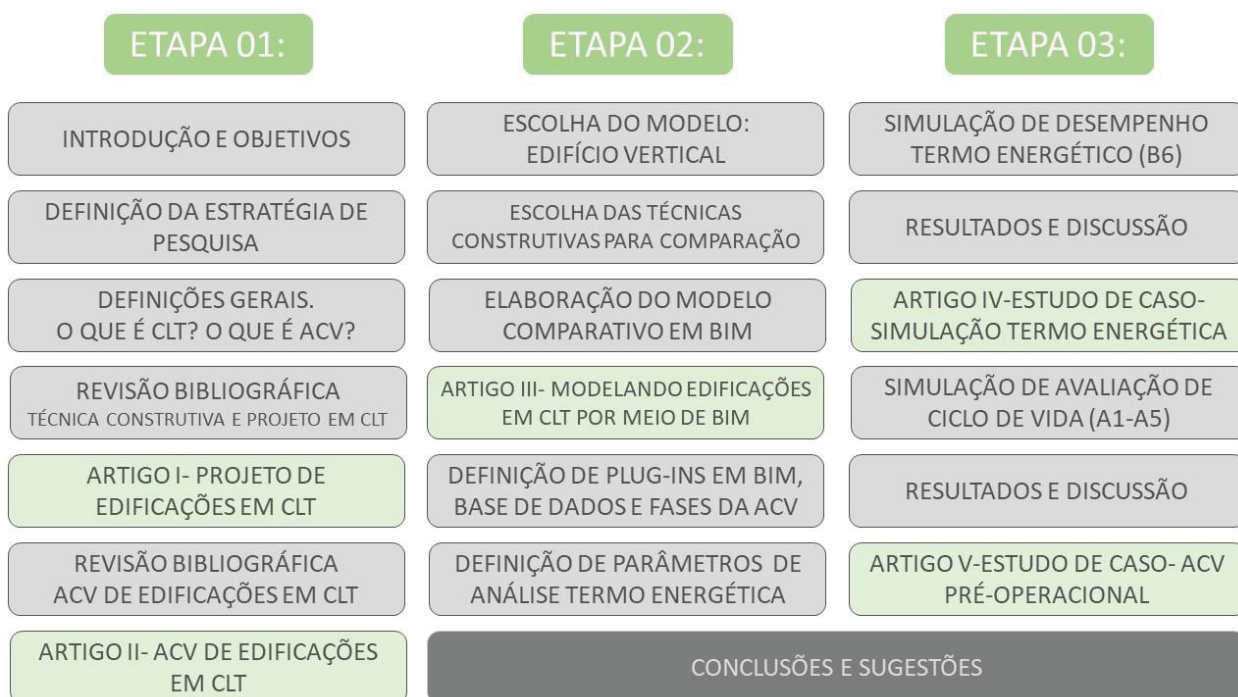
usualmente mais utilizada no Brasil, desta forma, esta pesquisa deve simular, por meio de modelos edificáveis em BIM o impacto ao longo do ciclo de vida das edificações.

A escolha dos materiais e técnicas construtivas a serem utilizados como modelos comparativos ao CLT se dá, principalmente, por conta da sua difusão e grande uso no Brasil, sendo o concreto armado e moldado *in loco* e bloco cerâmico por ser um processo construtivo pesado, assim como o CLT. Já a escolha por comparar também com um modelo que utilize os blocos de concreto estruturais acontece devido a esta técnica construtiva permitir que a edificação tenha um comportamento autoportante.

### 3.1.2 Mapa mental de execução da pesquisa

A seguir é apresentado o mapa mental com a organização das atividades desenvolvidas por esta pesquisa.

QUADRO 6 – MAPA MENTAL DA PESQUISA



FONTE: A autora (2019).

### 3.1.3 Validade

As esferas de validade conferem a pesquisa qualidade (Yin, 2005). Sendo assim, a seguir estão descritas as validades desta pesquisa.

#### 3.1.3.1 Validade do constructo

A validade do constructo será buscada pela utilização de diversas fontes de pesquisa, buscas bibliográficas, estudos de estado da arte que relacionem o tema abordado com as principais produções que vem sendo feitas no meio científico. Esta validade se refere ao que tange a parte exploratória e qualitativa desta pesquisa.

Já para responder ao questionamento dos impactos ambientais gerados pelo CLT será utilizada a Avaliação de Ciclo de Vida de um edifício vertical em CLT e comparado a outra técnica construtiva. Esta validade se refere ao que tange a parte quantitativa desta pesquisa, por meio de um estudo de caso comparativo que permita quantificar os impactos da técnica construtiva do CLT aplicada ao Brasil pelo viés ambiental.

#### 3.1.3.2 Validade interna

Como a pesquisa é parcialmente de cunho exploratório e se pretende atentar em um primeiro momento a dados qualitativos a respeito do uso do CLT, é possível concluir que a pesquisa não tem uma validade interna verificável para essa etapa. Entretanto, como em um segundo momento serão levantados os gastos energéticos para produção de um edifício em CLT e o desempenho termo energético do edifício, estes dados podem ser verificados.

Neste estudo de caso será tratado o gasto energético e emissão de gás carbônico de um edifício em CLT. Estes dados serão comparados aos da mesma edificação, porém simulada com a utilização de outra técnica construtiva convencionalmente utilizada no Brasil.

Ainda é importante que estejam estruturadas as fases da pesquisa e de elaboração de um modelo edificável em BIM, para que todo o projeto tenha uma sequência lógica e para que com o andamento da pesquisa seja possível encadear as evidências que cercam o tema. Para isso é importante que o relatório do estudo comparativo desta pesquisa seja revisado, a fim de detectar lacunas de informação ou de conhecimento ao longo do processo para que este possa ser verificado por meio de outros estudos de caso de mesmo viés, por meio da validade externa.

#### 3.1.3.3 Validade externa

A pesquisa ter caráter exploratório e, por conseguinte, esta etapa não tem procedimentos para validade externa estabelecidos.



Todavia, como em um segundo momento será feita uma análise comparativa do gasto energético para a produção de um modelo de edifício vertical na técnica construtiva CLT com outra técnica construtiva mais comumente aplicada à construção de edifícios verticais no Brasil, o método utilizado para esta etapa pode ser verificado e replicado por outras pesquisas, já que irá buscar dados da literatura técnica e aplicá-las em um caso específico.

Apesar de ser possível replicar o estudo, é necessário observar que o resultado desta pesquisa pode ser diferente do atingido em outros estudos de caso ou estudos de caso comparativo, por conta de diferenças de projeto, número de pavimentos, espessura do painel de CLT, dentre outros itens.

Também o desempenho termo energético deste modelo de edifício pode ter seu método de execução verificado, utilizando base de dados para esta simulação e, portanto, permitindo que este estudo seja rastreado, tendo a mesma ressalva feita para a etapa anterior da pesquisa.

#### 3.1.3.4 Confiabilidade

A confiabilidade da pesquisa é a capacidade dela em construir um protocolo de coleta de dados com riqueza em informações e que contemple todas as etapas desta pesquisa a fim de garantir que a pesquisa seja reproduzível dentro das mesmas condicionantes, por meio de um estudo de caso. Desta forma, a pesquisa deve descrever de maneira imparcial todas as etapas percorridas para que outros estudos de caso possam ser feitos dentro dos mesmos parâmetros, porém, por se tratar de um estudo de caso, os resultados quantitativos obtidos pelo mesmo não são comparáveis a outros estudos, devido a possíveis diferenças com relação as características do modelo.

### 3.4 UNIDADE DE ANÁLISE

A unidade de análise desta pesquisa é um projeto de edifício vertical que permita a utilização de painéis de CLT como vedação e estrutura para servir de modelo para esta simulação. A partir desta unidade, o trabalho passará por uma etapa de investigação, sobre as possibilidades construtivas com o CLT no Brasil e para a Avaliação do Ciclo de Vida desta edificação vertical em um estudo comparativo com outras técnicas construtivas.

### 3.3 PROTOCÓLO DE COLETA DE DADOS



Conforme o Mapa Mental, apresentado no Quadro 04, a pesquisa seguirá as seguintes etapas:

- Revisar a literatura sobre o tema do CLT, analisando o cenário do CLT no mundo e no Brasil, qual é a tecnologia embutida para a fabricação do CLT, gasto energético para sua produção, destinação final, quais os tipos de madeira mais utilizados e a percepção do público em relação ao CLT aplicado a edificações verticais;
- Eleger uma edificação vertical residencial que possa ter seu processo construtivo modificado para um processo de construção utilizando o CLT, dando preferência por edificações verticais devido as características autoportantes dos materiais;
- Modelar em BIM a edificação para o CLT, para a técnica construtiva com estrutura de concreto armado e alvenaria de bloco cerâmico e para bloco de concreto estruturais;
- Estudar plugins em BIM para ACV e consumo operacional da edificação, a fim de criar um processo contínuo de transformação de informação para projetistas durante as fases iniciais de projeto com relação a tomada de decisão dos materiais utilizados como estrutura e vedação das edificações;
- Estudar a disponibilidade de bases de dados para coleta de informações relativas ao inventário dos materiais utilizados para a execução do edifício, sendo um fator importante a ser analisado a falta de um inventário brasileiro de ACV dos materiais;
- Utilizar os dados quantitativos de materiais para que sejam feitos os cálculos de ACV simplificada para as seguintes categorias de impacto: Energia primária (MJ), energia não renovável (MJ), energia renovável (MJ) e potencial de aquecimento global (kg CO<sub>2</sub>eq.). Bem como avaliar de modo complementar outros critérios que possam ser relevantes ao estudo, tais como acidificação (kg SO<sub>2</sub>eq.), eutrofização (kg Neq.), depelação de ozônio (kg CFC-11eq.).

As fases consideradas para a ACV são: fase pré-operacional (A1- A4) exceto construção e montagem (A5), operacional (B2-B5), exceto uso (B1) e consumo operacional de água (B7), final do ciclo de vida (C2-C4), exceto demolição (C1) e a fase além, que diz respeito ao próximo ciclo de vida dos materiais provenientes da demolição desta edificação (D);

- Simular em separado os gastos termo energéticos da edificação durante parte da fase operacional do edifício (B6) por meio de integração com BIM;
- Criar tabelas e gráficos demonstrativos que apresentem os resultados da ACV da edificação para as diferentes técnicas construtivas;

- Comparar as três técnicas construtivas a fim de analisar o impacto ambiental gerado por elas;
- Concluir sobre as experiências relacionadas ao uso de ferramentas para cálculo de desempenho termo energético e ACV em BIM.

### 3.3.1 Método de análise de dados

Os dados de entrada são: a revisão de literatura, a escolha de uma edificação vertical para o estudo comparativo e a adaptação desta edificação para diferentes técnicas construtivas em um mesmo modelo. Ainda se tem como dados de entrada: a determinação dos métodos construtivos a serem comparados, a estimativa de materiais utilizados e a escolha de uma ou mais bases de dados de ACV. Também fazem parte desta etapa a determinação de plugins em BIM para a ACV e para a avaliação do desempenho termo energético da edificação.

A etapa de análise consiste no cálculo dos impactos ambientais para o edifício vertical modelado com diferentes materiais e técnicas construtivas. Também a análise do desempenho termo energético é objeto desta etapa da pesquisa.

Já os dados de saída serão analisados de maneira linear e incluem a comparação da ACV relativa à fase pré-operacional da edificação para os diferentes materiais e técnicas construtivas e a análise de desempenho termo energético comparativa para a edificação utilizando diferentes materiais e técnicas construtivas. Os dados de saída serão apresentados em forma de gráficos e tabelas e explicados nos resultados da pesquisa.

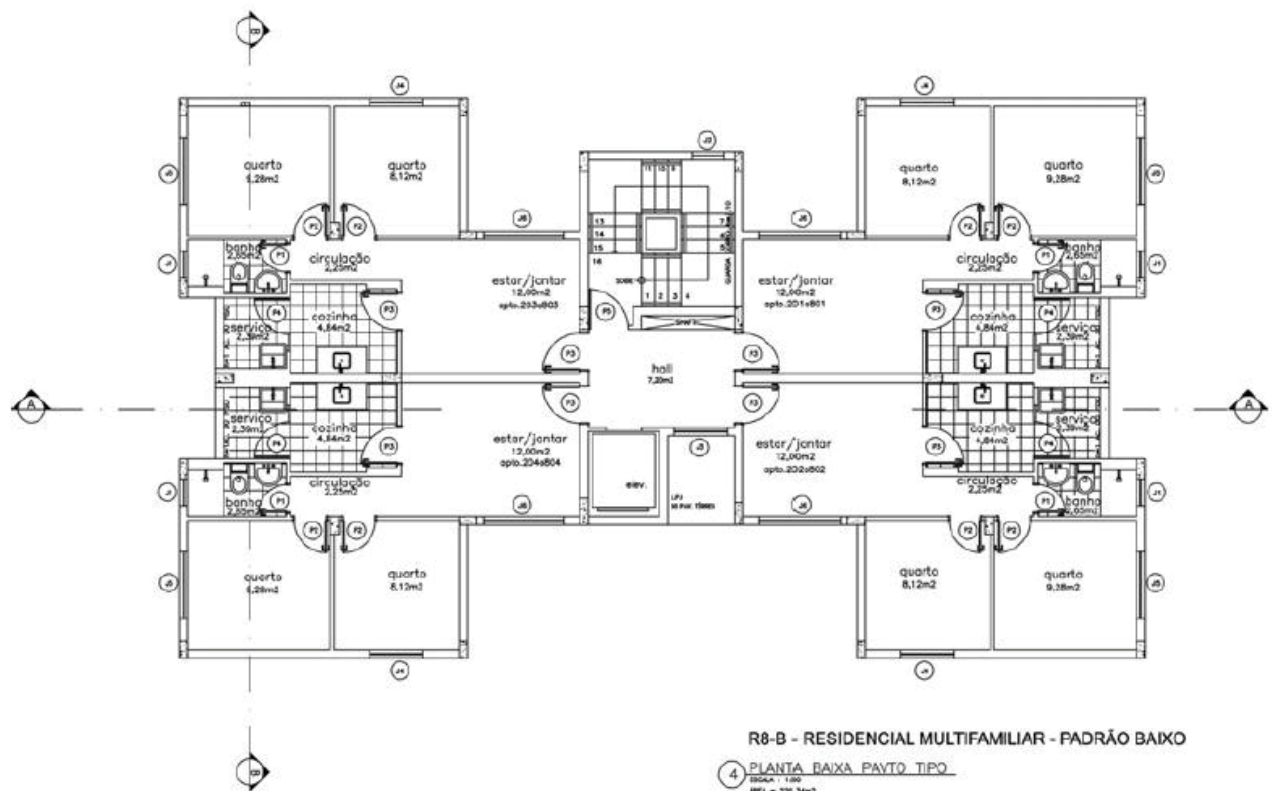
## 4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo é destinado a descrição da edificação a ser utilizada e o modelo para simulação de ACV, bem como as alterações projetuais no modelo para que o mesmo possa ser elaborado por meio de diferentes técnicas construtivas.

### 4.1 EDIFICAÇÃO UTILIZADA PARA O ESTUDO DE CASO COMPARATIVO

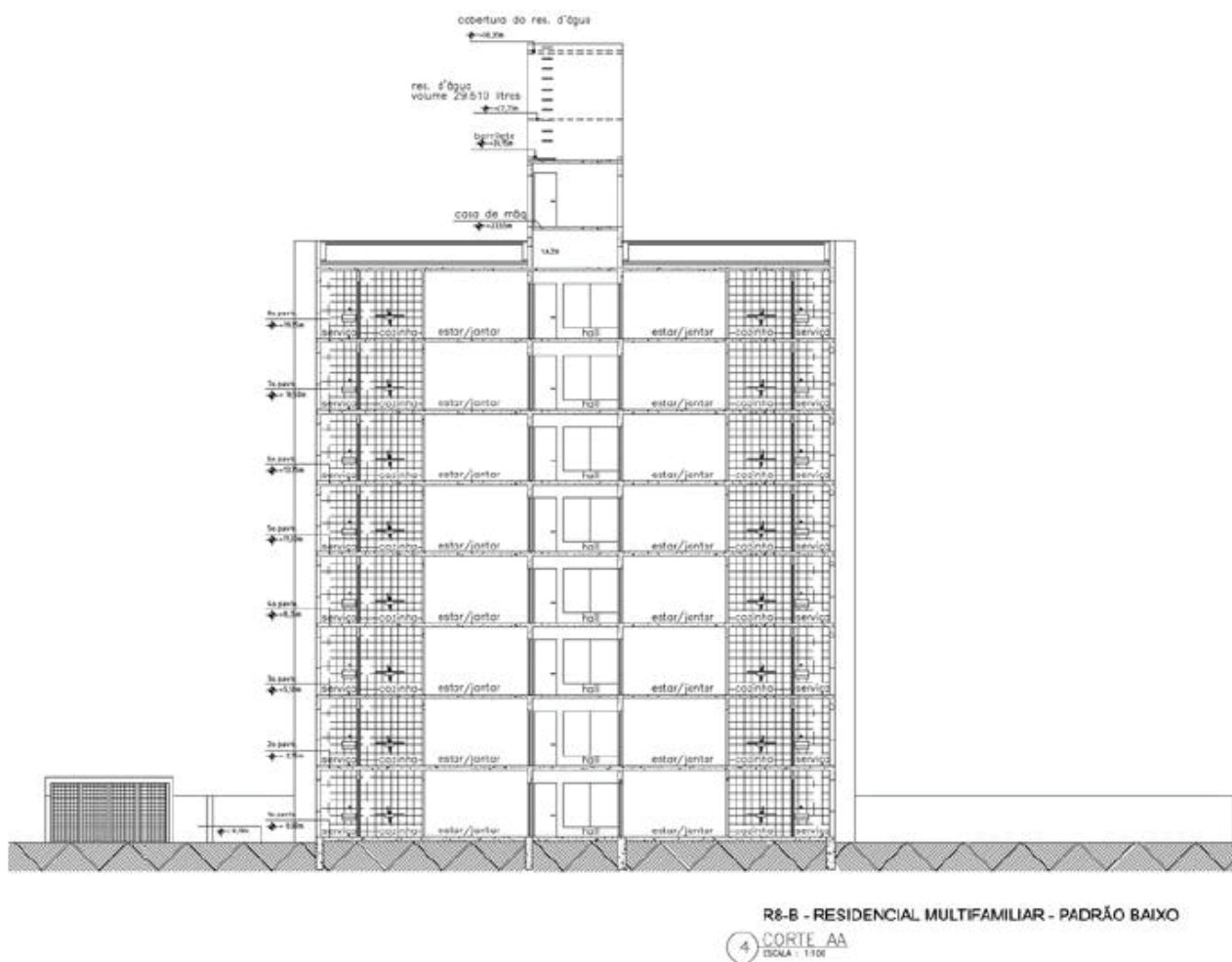
Para este estudo foi eleita uma edificação vertical utilizada pelo SINDUSCON como balizador para o cálculo dos custos unitários básicos da construção civil, o CUB (NBR-12721, 2006). A edificação utilizada como referência na elaboração do estudo do edifício vertical é denominada R8-B, pois se trata de um edifício residencial de oito pavimentos totais utilizado como habitação social, conforme mostra a Figura 10 e 11. Este edifício é comumente aplicado para a elaboração de estudos com relação aos custos de habitações verticais de oito pavimentos em todo o território brasileiro (SINDUSCON MG, 2007).

FIGURA 10 – PLANTA BAIXA PAVIMENTO TIPO R8-B (SEM ESCALA)



FONTE: Sinduscon MG (2007).

FIGURA 11 – CORTE DA EDIFICAÇÃO TIPO R8-B (SEM ESCALA)



FONTE: Sinduscon MG (2007).

A edificação R8-B é uma Residência multifamiliar de baixo padrão: Pavimento térreo mais sete pavimentos-tipo, casa de máquinas e caixa d'água superiores. Contendo no pavimento térreo o hall de entrada, elevador, escada e quatro apartamentos com dois dormitórios cada, com cerca de 42 m<sup>2</sup>. A planta do térreo é quase semelhantes aos demais pavimentos, exceto pela porta de acesso, uma vez que nos demais pavimentos a parede que abriga a porta de acesso está recuada e recebe uma janela, conforme pode ser visto na Figura 10.

Cada apartamento conta com dois dormitórios, sala de estar e jantar conjugadas, um sanitário, cozinha e área de serviço. Na área externa estão localizados o cômodo de lixo e 32 vagas descobertas, no entanto, por estas partes não fazerem parte do corpo da edificação, serão desconsideradas na elaboração do modelo utilizado como estudo de caso. A área total construída é de 2.801,64 m<sup>2</sup> considerando as instalações presentes no térreo, conforme descritas anteriormente. Já a área equivalente ao edifício é de 1.885,51 m<sup>2</sup> (SINDUSCON MG, 2007).

A escolha da edificação R8-B se deu por conta inicialmente de encontrar um modelo simplificado e que retrate a realidade brasileira com relação ao perfil das edificações construídas, assim fomentando a discussão acerca da viabilidade de aplicar novas técnicas construtivas em edificações de cunho coletivo, de financiamento público e de relevância urbana e social.

Todavia, é importante ressaltar que apesar desta edificação ser tomada como base para a modelagem, sua forma e materiais serão adaptados para melhor atender aos pré-requisitos estruturais e funcionais do CLT, desta maneira, serão levantadas as principais modificações elaboradas a partir do modelo, já que no modelo indicado pelo CUB são consideradas paredes internas em *dry wall*, no entanto, se estas forem levadas em consideração nas análises de impacto ambiental, podem evidenciar resultados distintos daqueles desejados a partir da comparação entre edificações em concreto versus edificações em madeira massiva (CLT).

A escolha de um projeto de habitação multifamiliar vertical aconteceu devido as evidências de que a técnica construtiva CLT se torna viável conforme o crescimento do número de pavimentos da edificação (SKULLESTAD; BOHNE; LOHNE, 2016), e que funciona como estrutura e vedação. Assim, a demonstração da capacidade construtiva desta técnica autoportante com grande capacidade estrutural é a justificativa para que uma edificação vertical fosse escolhida para este estudo de caso comparativo.

#### 4.4 ELABORAÇÃO DO MODELO

Após eleito o modelo a ser utilizado para o estudo, o software para elaborar a modelagem foi escolhido, sendo o primeiro fator de escolha a capacidade do software em ter interoperabilidade, extração e troca de informação. Neste sentido, o uso de BIM se torna uma prerrogativa de projeto. Outro fator importante no momento de escolha foi a disponibilidade de softwares ou plugins compatíveis para elaboração de ACV e análise operacional termo energética da edificação diretamente vinculados a modelagem BIM sem grandes perdas de informação ao longo do processo de transferência de dados.

O software em BIM utilizado para a modelagem da edificação foi o *Revit*. Este é um software desenvolvido pela *Autodesk* e que tem compatibilidade com diversos softwares, plugins instaláveis dentro de sua plataforma de trabalho, bem como apresenta uma boa variedade de componentes BIM para modelagem (AUTODESK REVIT, 2019).

O modelo da edificação R8-B (SINDUSCON MG, 2007) foi inicialmente elaborado com materiais genéricos e passou por algumas transformações iniciais, a fim de que pudesse

ser elaborado com medidas padronizadas e que facilitassem a transposição do modelo para diferentes técnicas construtivas. Desta forma, foram previstas paredes básicas compostas com quatorze centímetros (14 cm) de largura e distâncias entre elas que fossem múltiplas de quinze centímetros (15 cm), baseadas na modulação utilizada para edificações em blocos de concreto.

Já para a altura entre pavimentos foi necessário que fossem levadas em consideração as alterações de pé direto devido a capacidade estrutural de diferentes tipos de lajes, desta forma, foram levadas em consideração para o estudo as medidas máximas permitidas para o transporte de CLT, sendo que no Brasil, conforme especificações técnicas da empresa CROSSLAM (2019) que são a de transportar peças de até 3 x 12 metros. Foi então adotada a altura entre pisos de três metros (3 m), garantindo que o edifício pudesse ser elaborado em diferentes técnicas construtivas, mas que pudessem ser adotadas diferentes soluções estruturais para laje, sem que a altura total da edificação sofresse alteração.

A estratégia de garantir a modulação do edifício foi tomada com a finalidade de aumentar a precisão de suas dimensões e permitir a modulação e padronização da edificação, reduzindo desperdícios e facilitando a execução de obra. Para Rosso (1980), a modulação garante obras mais racionalizadas por meio da aplicação mais eficiente de recursos a fim de garantir produtos de alta efetividade. Ainda é interessante que o aspecto relativo à padronização dimensional seja levado em consideração, uma vez que permitem a construção seriada e a intercambialidade entre as indústrias produtoras (GREVEN E BALDAUF, 2007), desta forma viabilizando a execução.

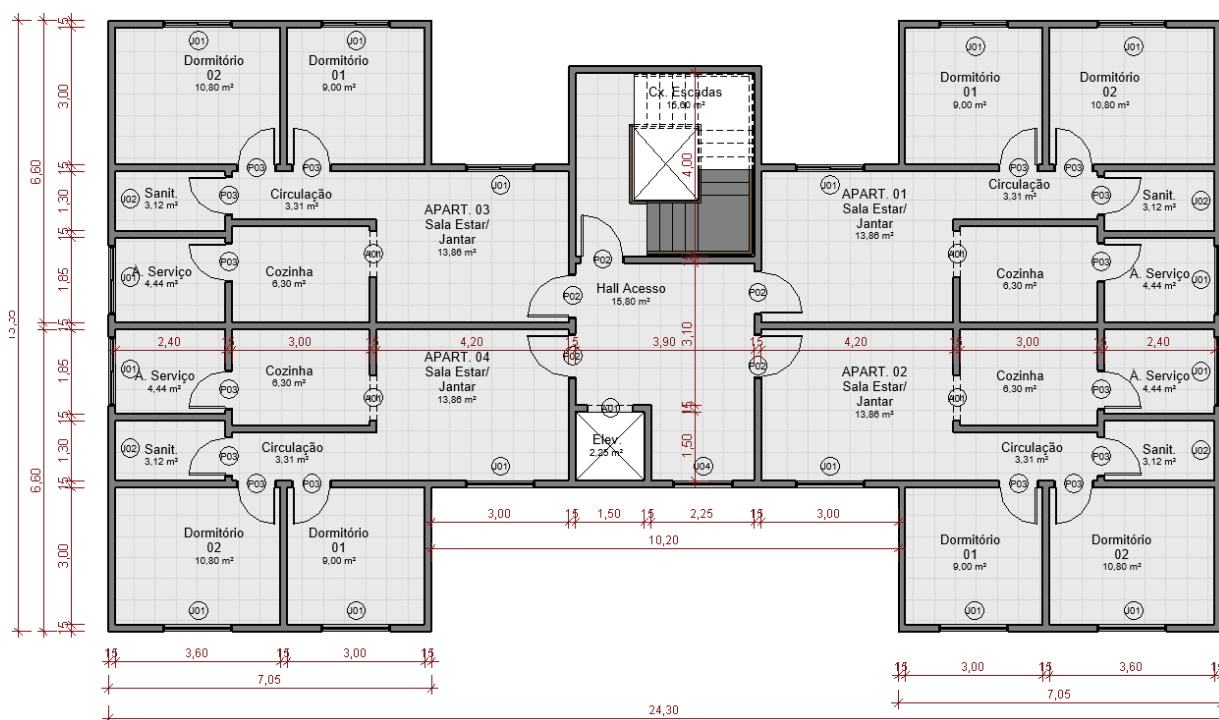
Além das alterações dimensionais da edificação para que esta pudesse ser modulada, algumas alterações na forma da edificação foram feitas a fim de facilitar a execução da edificação em CLT, por meio da racionalização e redução do número de painéis pequenos em detrimento daqueles de maior dimensão, conforme pode ser observado na Figura 12.

As alterações podem ser observadas em dois locais, além da escada que teve sua sequência alterada a fim de atender a altura de três metros entre pisos. A primeira alteração é no hall de acesso aos apartamentos, já que este tinha um pequeno recuo em sua parede ao lado da caixa de elevadores, o qual foi retirado do projeto, deixando todos os halls com uma dimensão idêntica àquela do hall de entrada no pavimento térreo.

A outra alteração percebida é com relação a parede externa da área de serviço dos apartamentos. Sua geometria foi alterada para que o modelo pudesse ser elaborado por meio do uso de dois painéis de CLT com cerca de seis metros e cinquenta centímetros (6,5 m) de comprimento e para que não fosse necessário que diversos pequenos painéis compusessem esta

fachada, otimizando o transporte, reduzindo encaixes e, finalmente, aumentando sutilmente a área da edificação, conforme pode ser observado pela Figura 12.

FIGURA 12 – MODULAÇÃO E ALTERAÇÕES NA PLANTA TIPO DA EDIFICAÇÃO R8-B (SEM ESCALA)



FONTE: A autora (2019), com base em Sinduscom MG (2007).

A partir da Figura 12 é possível visualizar que houve um leve acréscimo nas áreas da edificação por conta das alterações com relação a modulação e com os ajustes para a racionalização do uso de painéis de CLT. Deste modo, a área interna útil de cada apartamento passa de cerca de 42 m<sup>2</sup> para 50,82 m<sup>2</sup>, criando ambientes mais confortáveis. A área total construída do pavimento tipo, considerando quinze centímetros (15 cm) de espessura de paredes é de 269,18 m<sup>2</sup>, resultando em uma área construída da edificação de 2.161,10 m<sup>2</sup>. Apesar de esta área ser a base para a avaliação, devem ser ainda levados em consideração os acabamentos utilizados e as diferenças de espessura de cada material. Neste sentido, podem haver pequenas alteração nas medidas finais da edificação, por conta dos revestimentos externos a mesma, conforme será explicado a seguir ao longo da descrição da escolha de materiais.

#### 4.5 MODELAGEM DA EDIFICAÇÃO EM CLT



A partir da escolha do modelo e das técnicas construtivas que serão avaliadas, tem início a elaboração dos detalhes construtivos do modelo. Deve-se adotar o uso de madeira produzida em florestas plantadas brasileiras e transformadas em painéis por uma fábrica de CLT no Brasil, na cidade de Suzano-SP, conforme especificações de uma fábrica de CLT no Brasil. A montagem da edificação deve ser feita na cidade de Curitiba-PR, deste modo, devem ser consideradas as características dos painéis de CLT produzidos com árvores da espécie *Pinus taeda*, aplicadas ao clima da capital paranaense, segundo a NBR 15220:3 (2005b) classificado dentro da Zona Bioclimática 1.

Apesar de consideradas as características dos painéis fabricados com madeira produzida em florestas plantadas nacionais, é ainda importante que sejam observadas quais são as normativas e parâmetros que regem o projeto de edificações em madeira massiva, conforme analisado no item 2.6 deste trabalho. Neste sentido, o cálculo deve ser elaborado com base nas legislações e diretrizes de outros países com relação ao uso de madeira massiva e, principalmente, com base nos três edifícios estudados no item 2.7.

#### 4.3.1 Edificação projetada em CLT

Foi escolhida a elaboração do modelo a partir do uso do sistema estrutural apenas em CLT com montagem do tipo plataforma (*platform frame*), sendo adotados valores de resistência disponibilizados pela empresa *Stora enso* (2019), por meio do uso de componentes de painéis de CLT disponibilizados em BIM, sendo que o tipo de madeira especificada pelo componentes é do gênero *Picea*, sem que seja especificada a espécie utilizada. O projeto tinha como premissa o uso de madeira proveniente de floresta plantada brasileira, sendo a espécie escolhida o *Pinus taeda*, contudo, devido à falta de informações disponíveis acerca de painéis elaborados com o *Pinus* plantado no país, optou-se por manter a espécie de conífera especificada pelos componentes em BIM para elaboração do modelo deste estudo de caso.

Ainda com relação aos componentes em BIM dos painéis de CLT utilizados, a busca foi feita no site de empresas fabricantes, sendo que o único conjunto de componentes de painéis em CLT disponibilizados online era o da empresa *Stora enso*, com sede na Finlândia, dentro da plataforma *ProdLib* (2019), uma biblioteca de componentes fornecidos por empresas para softwares de autoria BIM. Por tanto, estes componentes foram utilizados para a composição dos painéis, necessitando apenas pequenos ajustes para que os quantitativos pudessem ser elaborados de maneira mais precisa. Apesar de disponibilizar os painéis como componentes, a

empresa não disponibiliza as junções metálicas responsáveis por conectar as peças, sendo que estas tiveram que ser estudadas a parte a fim de atender as demandas estruturais do projeto.

Optou-se por adotar medidas e espessuras de painéis de CLT disponíveis dentro da plataforma utilizada, bem como, para as relações de resistência e capacidade térmica foram mantidos os dados fornecidos pela empresa, sendo estes já embutidos nos componentes BIM.

Desta forma, para os painéis verticais externos foram adotadas cinco (5) camadas de tábuas de madeira, de acordo com as cargas recebidas, sendo assim, para o primeiro e segundo pavimento foi adotado painel de 180mm, do terceiro ao quinto 160mm e para os dois últimos pavimentos foram utilizados painéis de 140mm para as paredes externas. Já para as paredes que subdividem cômodos no interior das unidades devem ser adotadas como padrão o uso de painéis de 120mm com acabamentos similares àqueles utilizados no interior das paredes externas, assim, devem ser adotados o gesso acartonado e a pintura como materiais de acabamento do interior da edificação, conforme pode ser visto na Figura 13 A.

Para o núcleo central, que contém o Hall de acesso, caixa de escadas e elevador, e parede divisória entre unidades habitacionais, devem ser adotados painéis de mesma medida em todos os pavimentos por conta da maior resistência ao fogo, sendo estes compostos por cinco (5) camadas com uma espessura total de 180mm.

Ressalte-se que para o pavimento térreo foi adotado o uso do concreto e alvenaria em tijolos, sendo este similar ao térreo do edifício em concreto e alvenaria a ser comparado pelo estudo de caso e descrito pelo item 4.4 deste trabalho, justificado pelo afastamento do material do solo e do contato com a umidade.

As lajes foram elaboradas também com painéis de CLT de 140mm, sendo que a maior dimensão atendida pela laje sem apoios intermediários é a do vão do Hall de Acesso aos apartamentos, tendo cerca de 5,00m de comprimento. Ainda os painéis utilizados como laje nos quartos, têm cerca de 7,00m de comprimento, porém apoiados acerca de 3 metros da borda por uma parede interna. Na área central da edificação os painéis têm cerca de 10,00 m de comprimento, no entanto, estes têm 2 apoios entre suas extremidades, totalizando 4 apoios da peça. A distribuição dos painéis e sentido da laje pode ser visto na Figura 14.

Com relação a fundação dessa edificação, estima-se o mesmo, por meio de analogia com o edifício *Origine* (Figura 07 C). Neste edifício, o cálculo para a fundação foi feito em proporção a relação do volume de terra movimentado por sua fundação, assim, o volume de terra movimentado para execução de sua fundação deve ser o mesmo que o peso da edificação, sendo que se este fosse feito em concreto, seria necessário o dobro deste volume para as fundações, inviabilizando o projeto (WOOD-WORKS, 2018). Assim, as fundações desta

edificação estão incluídas no escopo deste estudo, calculadas a partir do peso deslocado de terra para cada modelo.

O acabamento adotado no interior da edificação, como já dito anteriormente é o de gesso acartonado com a espessura de 15mm, recebendo uma pintura branca em tinta a base d'água. Já para o acabamento externo foi adotado como padrão o uso de uma membrana hidrófuga na superfície recoberto por painéis em EPS 30mm, uma camada de ar de 20mm e acabamento em placa cimentícia, configurando uma fachada ventilada, conforme pode ser visualizado pela Figura 13 A. Nas lajes deve ser adotado o uso de argamassa de contra piso e deve ser feito o assentamento de cerâmica 46x46cm na cor branca em sua face superior. Já na face inferior deve ser adotado o uso de placas de gesso acartonado com pintura a base d'água na cor branca, para fins de melhoramento do isolamento acústico entre as unidades e entre pavimentos.

FIGURA 13 A E 13 B – SEÇÃO TIPO DAS PAREDES EXTERNAS E INTERNAS DO MODELO EM CLT



OBS.: (existem alterações nas espessuras do clt, mas os acabamentos permanecem os mesmos)

FONTE: A autora (2019).

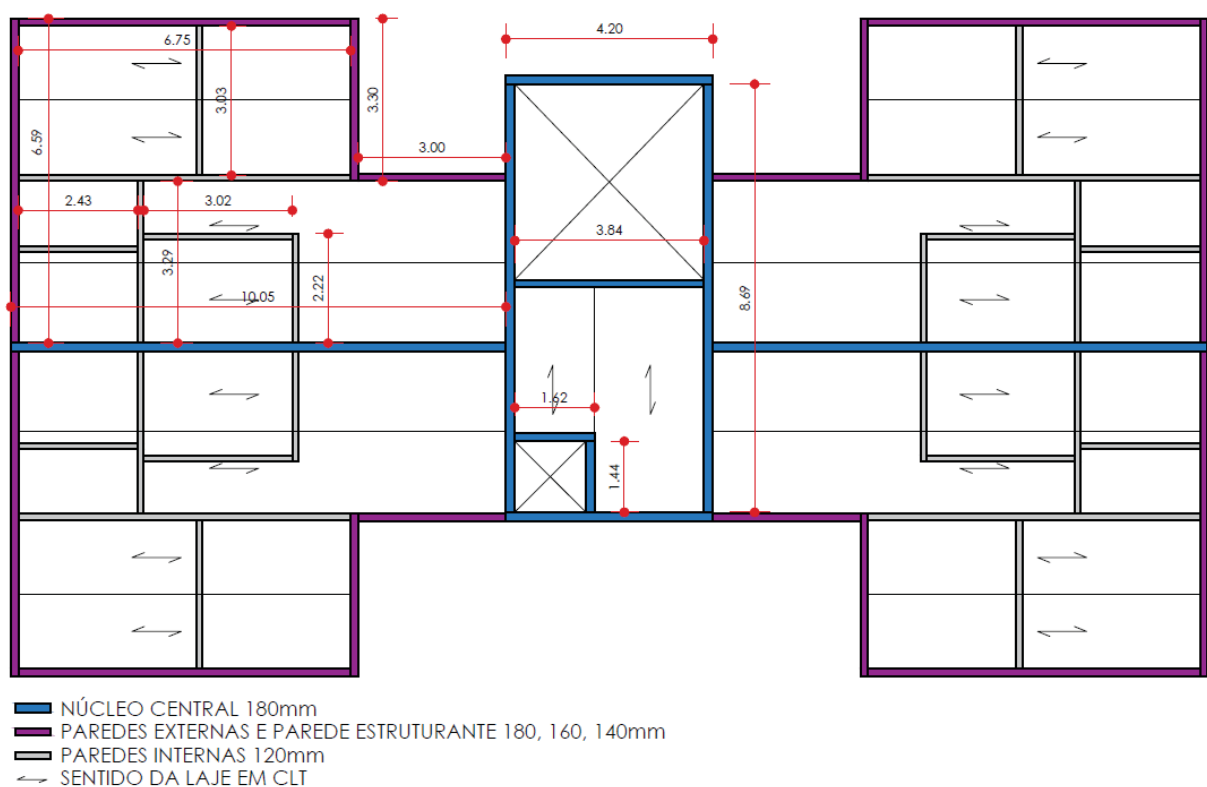
Para fins de cálculo, não foram avaliados outros itens relativos à obra, tais como instalações elétricas e hidráulicas, sistemas complementares como aquecimento de água, ar condicionado ou outros. Também não foram considerados na criação do modelo os tipos de pisos e forros adotados para a edificação. Para o sistema de cobertura foi adotado um sistema de manta impermeabilizante coberta por argamassa de regularização e instalação de piso cerâmico.

Já para as esquadrias, foram adotadas aquelas disponibilizadas nos componentes de *Revit* em alumínio e vidro simples, sendo estas de mesmas dimensões e materiais daquelas utilizadas no modelo em alvenaria e concreto.

#### 4.3.2 Uso de componentes BIM para elaboração do modelo e quantitativos

É sabido que o uso da plataforma BIM pode auxiliar no desenvolvimento de projetos de arquitetura e de engenharia, sendo que um dos objetivos deste trabalho é o de demonstrar que o projetista tem alternativas para decidir com relação a escolha de madeira ainda durante o projeto, utilizando critérios de avaliação ambiental tais como a análise do consumo operacional e a Avaliação do Ciclo de Vida do edifício.

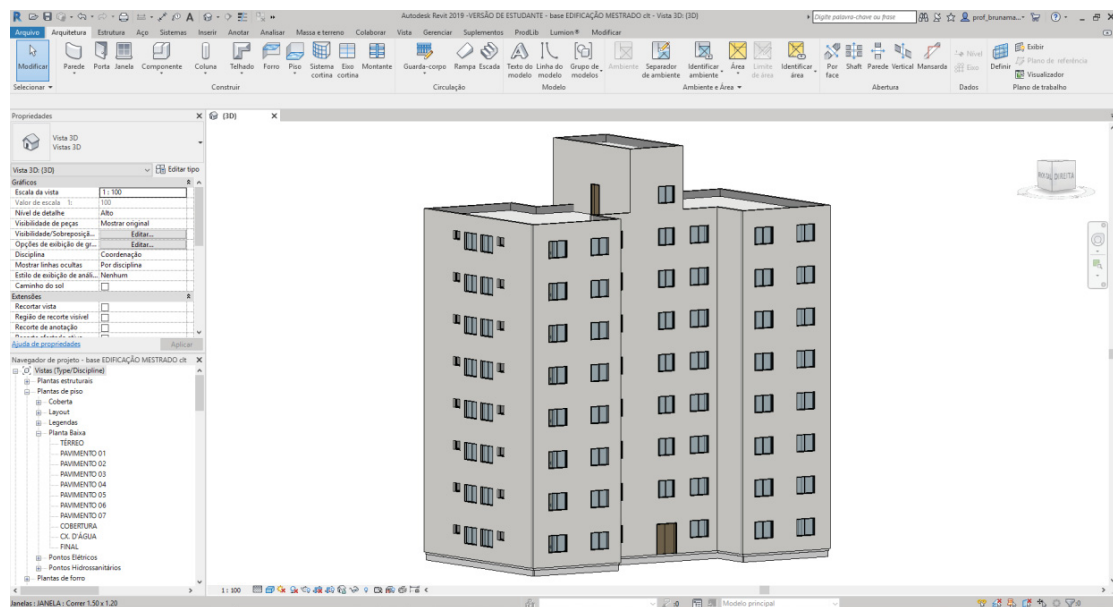
FIGURA 14 –DISTRIBUIÇÃO DOS PAINÉIS DO MODELO EM CLT



FONTE: A autora (2019).

Desta maneira, na Tabela 05 são disponibilizados os quantitativos totais da edificação em CLT modelada em BIM para este estudo comparativo, sendo que estes são resultado de uma somatória de valores calculados por meio do software *Revit* e que devem ser posteriormente utilizados para os cálculos de ACV.

FIGURA 15 – MODELO EM CLT



FONTE: A autora, via Revit (2019).

TABELA 5 – QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O MODELO EM CLT

Nome	Área	Volume
Aço	2,57 m²	0,15 m³
Cerâmica 46x46cm Branca	2279,56 m²	11,40 m³
Concreto	2005,03 m²	214,67 m³
Contra piso	2279,56 m²	56,99 m³
Madeira	2303,09 m²	36,79 m³
.PACG_Pintura_Branca	9306,15 m²	0,00 m³
000B_Camada_de_Ar	2784,23 m²	125,53 m³
000B_Esquadria_Alumínio	581,71 m²	6,91 m³
000B_Esquadria_Vidro	451,05 m²	3,26 m³
000B_Estudo_de_Massa_1	1546,78 m²	140,49 m³
000B_Gesso_acartonado_Drywall	9291,75 m²	148,80 m³
000B_Isopor_Forro	2303,50 m²	68,12 m³
000B_Manta_Aluminio	32,06 m²	1,60 m³
000B_Manta_Comum	252,63 m²	1,26 m³
000B_Placa_Cimenticia	2052,12 m²	40,39 m³
CLT - horizontal	17291,66 m²	589,89 m³
CLT - vertical	11527,40 m²	260,62 m³
Tijolo, Comum	538,71 m²	69,17 m³

OBS.: nesta tabela não estão contabilizados os valores dos perfis de alumínio que seguram as placas cimentícias da fachada ventilada.

FONTE: A autora, via Revit (2019).

A partir dos quantitativos apresentados na Tabela 05 é possível inferir que foram consumidos 750,98 m³ de madeira para a fabricação dos painéis de CLT, em uma área construída de 2.161,10 m² resultando em 0,347 m³ de madeira por metro quadrado construído,

valor próximo àquele obtido nas edificações *Stadthaus* e *Via Cenni*, conforme pontuado no item 2.7.

#### 4.3.3 Modelagem da edificação em concreto armado e alvenaria de bloco cerâmico

Conforme o modelo acima descrito em CLT, também o modelo para comparação com estrutura em concreto armado e alvenaria de bloco cerâmico deve ser elaborado em BIM. Este modelo deve seguir os mesmos princípios do modelo em CLT, contudo alterando seu sistema construtivo para a fabricação em vigas e pilares de concreto armado e moldados *in loco*, e vedação em alvenaria de bloco cerâmico também montados no local da obra. A escolha por este sistema construtivo aconteceu devido a este ser um dos sistemas construtivos mais difundidos no Brasil e por apresentar técnicas bastante conhecidas por profissionais da área.

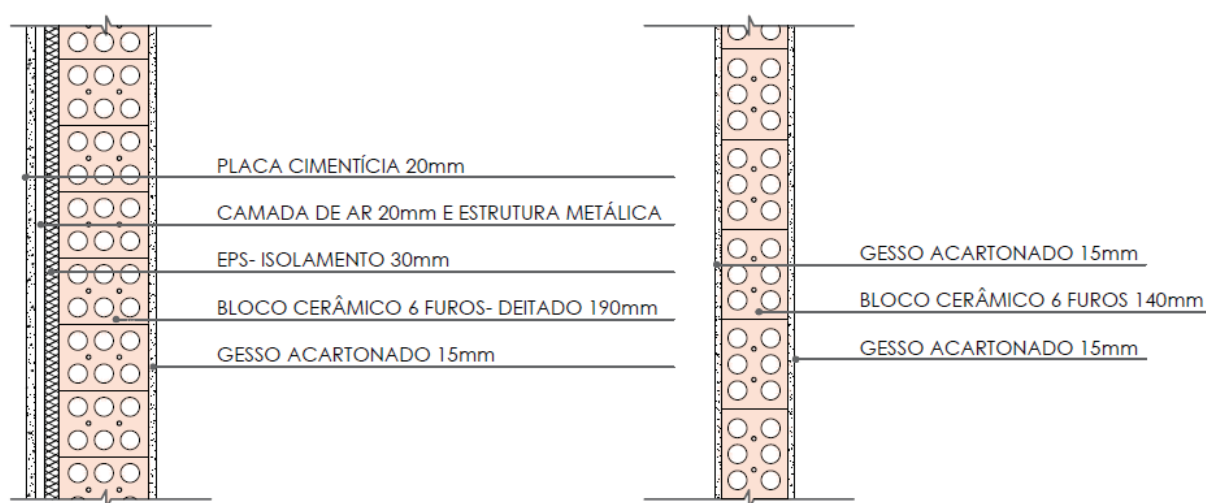
Todavia, no modelo em CLT conforme há o acréscimo do número de pavimentos, pode haver uma pequena redução na espessura dos painéis verticais, devido a redução da necessidade estrutural das peças, no entanto, por esta redução representar uma reduzida parcela nos valores da edificação de concreto armado, todos os pavimentos deste modelo foram calculadas como sendo idênticos.

Também as paredes permanecem idênticas em todos os pavimentos, sendo consideradas para o núcleo central e divisão entre apartamentos o uso de bloco cerâmico deitado, utilizando a medida de 190mm como largura do bloco cerâmico, e para as paredes de vedação externa considerado o uso de blocos cerâmicos de 140mm, medida também adotada para as divisórias entre cômodos de um mesmo apartamento, sendo os acabamentos responsáveis pelo acréscimo de medidas as vedações verticais, conforme pode ser visto pela Figura 16.

Apesar de esta técnica construtiva ter sido escolhida, diversos outros elementos serão feitos de maneira idêntica ao modelo em CLT. Neste sentido, os materiais de acabamento internos e externos adotados devem ser os mesmos daqueles adotados pela edificação em CLT.

Ainda para o modelo em blocos cerâmicos, foram consideradas vergas e contravergas em concreto pré-fabricadas para todas as janelas e portas, o que também foi considerado no pavimento térreo do modelo em CLT, uma vez que apresenta as mesmas características deste modelo.

FIGURA 16 A E 16 B – SEÇÃO TIPO DAS PAREDES EXTERNAS E INTERNAS GERAIS DO MODELO EM CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO



OBS.: (existem alterações nas espessuras dos blocos cerâmicos, mas os acabamentos permanecem os mesmos)

FONTE: A autora (2019).

TABELA 6 – QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O MODELO EM CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO

Material: Nome	Material: Área	Material: Volume
.Cerâmica 46x46cm Branca	2211,66 m <sup>2</sup>	11,06 m <sup>3</sup>
.Concreto	7586,47 m <sup>2</sup>	675,03 m <sup>3</sup>
.Contra piso	2211,66 m <sup>2</sup>	55,29 m <sup>3</sup>
.Madeira	2175,45 m <sup>2</sup>	28,38 m <sup>3</sup>
.PACG_Pintura_Branca	9220,56 m <sup>2</sup>	0,00 m <sup>3</sup>
000B_Camada_de_Ar	3633,50 m <sup>2</sup>	283,29 m <sup>3</sup>
000B_Concreto	159,61 m <sup>2</sup>	8,89 m <sup>3</sup>
000B_Esquadria_Alumínio	555,90 m <sup>2</sup>	6,52 m <sup>3</sup>
000B_Esquadria_Vidro	451,05 m <sup>2</sup>	3,26 m <sup>3</sup>
000B_Estudo_de_Massa_1	254,58 m <sup>2</sup>	33,09 m <sup>3</sup>
000B_Gesso_acartonado_Drywall	9137,65 m <sup>2</sup>	132,44 m <sup>3</sup>
000B_Isopor_Forro	2297,84 m <sup>2</sup>	61,34 m <sup>3</sup>
000B_Manta_Comum	254,58 m <sup>2</sup>	1,27 m <sup>3</sup>
000B_Placa_Cimenticia	2050,84 m <sup>2</sup>	35,96 m <sup>3</sup>
Alumínio	370,63 m <sup>2</sup>	7,02 m <sup>3</sup>
Tijolo, Comum	4512,45 m <sup>2</sup>	589,98 m <sup>3</sup>

Observação: nesta tabela não estão contabilizados os valores dos perfis de alumínio que seguram as placas cimentícias da fachada.

FONTE: A autora, a partir de Revit (2019).

Além disso, as esquadrias e acabamentos da cobertura seguem o mesmo padrão para todos os modelos. Também as fundações são executadas da mesma forma, apenas com a ressalva com relação as dimensões desta, visto que o peso da edificação em concreto cresce



significativamente em relação àquela em CLT. Na Tabela 06 é possível verificar o quantitativo de materiais utilizados para a edificação em concreto e alvenaria.

#### 4.3.4 Modelagem da edificação em bloco de concreto

Além da modelagem da edificação em CLT (Cross-Laminated Timber) e em estrutura de concreto armado e alvenaria de bloco cerâmico, também um modelo de edificação em blocos de concreto vazados com grautes em concreto armado foi elaborado. O modelo segue as mesmas características dimensionais externas das demais alternativas e a modulação do modelo, conforme o item 4.2. A escolha por simular comparativamente também este sistema construtivo se deu por conta de este ser um sistema construtivo autoportante, e por o sistema ser bastante usual em edificações habitacionais no Brasil.

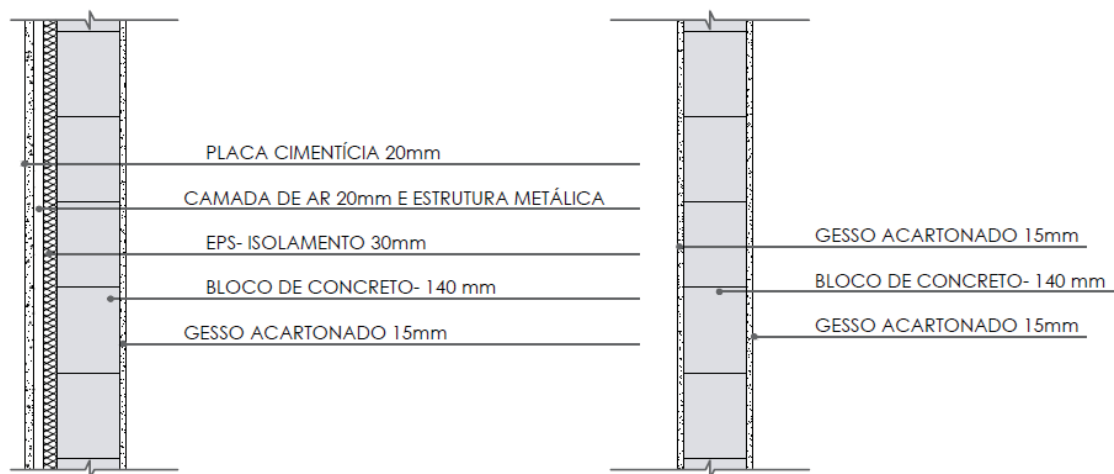
Neste modelo da edificação em blocos de concreto estruturais, a espessura das paredes externas e internas aos apartamentos é de 14 x 19 x 39 cm, sendo a medida de 14 cm utilizada para espessura do modelo e desta forma garantindo que todas as paredes, tanto internas como externas tenham a mesma espessura. Já o núcleo estruturante, que compreende as paredes internas e externas do hall de entrada, caixa de elevador e escadas, bem como parede divisória entre apartamentos, foi feita utilizando blocos de concreto estrutural com a dimensão de 19 x 19 x 39 cm, sendo a medida de 19 cm utilizada para a espessura da parede.

Ainda para o modelo em blocos de concreto, foram consideradas vergas e contravergas em concreto moldados *in loco*, instalados em blocos de concreto do tipo canaleta, sendo estes os mesmos modelos de bloco utilizados como vigas sobre todas as paredes.

Ainda com relação ao modelo, foi considerada a laje maciça em concreto moldada *in loco*, situação idêntica àquela utilizada no modelo em concreto armado e bloco cerâmico, em virtude da facilidade comparativa entre os modelos e visto que esta laje atende aos pré-requisitos estruturais de todos os modelos.

Com relação aos grautes, os locais de graute vertical e horizontal foram os mesmos onde se encontram a estrutura (pilares e vigas) do modelo em concreto armado, alterando apenas suas medidas conforme a demanda estrutural deste modelo autoportante em bloco de concreto. Outro elemento similar entre todos os modelos é o acabamento da edificação e as esquadrias, sendo considerado idêntico para todos os três (3) modelos da edificação, conforme pode ser visto pela Tabela 8. A edificação tem também o seu térreo elaborado em blocos de concreto ao contrário dos demais modelos, que utilizam o concreto e blocos cerâmicos.

FIGURA 17A E 17B - SEÇÃO TIPO DAS PAREDES EXTERNAS E INTERNAS DO MODELO EM BLOCO DE CONCRETO



OBS.: (EXISTEM ALTERAÇÕES NAS ESPESSURAS DOS BLOCOS DE CONCRETO, MAS OS ACABAMENTOS PERMANECEM OS MESMOS)

FONTE: A autora (2019).

TABELA 7 – QUANTITATIVO DE MATERIAIS PARA O MODELO EM BLOCO DE CONCRETO

Material: Nome	Material: Área	Material: Volume
.Cerâmica 46x46cm Branca	2186,24 m <sup>2</sup>	10,93 m <sup>3</sup>
.Concreto	6246,27 m <sup>2</sup>	564,23 m <sup>3</sup>
.Contra piso	2197,07 m <sup>2</sup>	53,14 m <sup>3</sup>
.Madeira	2175,45 m <sup>2</sup>	28,38 m <sup>3</sup>
.PACG_Pintura_Branca	9205,97 m <sup>2</sup>	0,00 m <sup>3</sup>
000B_Camada_de_Ar	3619,99 m <sup>2</sup>	284,37 m <sup>3</sup>
000B_Concreto	159,61 m <sup>2</sup>	8,89 m <sup>3</sup>
000B_Esquadria_Alumínio	555,90 m <sup>2</sup>	6,52 m <sup>3</sup>
000B_Esquadria_Vidro	451,05 m <sup>2</sup>	3,26 m <sup>3</sup>
000B_Estudo_de_Massa_1	254,58 m <sup>2</sup>	33,09 m <sup>3</sup>
000B_Gesso_acartonado_Drywall	9174,86 m <sup>2</sup>	142,34 m <sup>3</sup>
000B_Isopor_Forro	2299,70 m <sup>2</sup>	66,12 m <sup>3</sup>
000B_Manta_Comum	254,58 m <sup>2</sup>	1,27 m <sup>3</sup>
000B_Placa_Cimenticia	2050,84 m <sup>2</sup>	39,11 m <sup>3</sup>
Alumínio	370,49 m <sup>2</sup>	7,21 m <sup>3</sup>
Bloco de concreto	4519,81 m <sup>2</sup>	653,10 m <sup>3</sup>

Observação: nesta tabela não estão contabilizados os valores dos perfis de alumínio que seguram as placas cimentícias da fachada.

FONTE: A autora, a partir de Revit (2019).

A fundação segue o mesmo princípio das anteriores, tendo o modelo em bloco de concreto e aquele em concreto armado valores bastante similares, ao contrário do modelo em CLT, considerado com a dimensão de entorno de um terço (1/3) das demais alternativas, assim

como apontam outros estudos (COSTA, 2013; WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, 2018; TESHNIZI et al., 2018; ARCHITECTURE AU, 2018).

#### 4.4 DIFERENÇAS ENTRE OS MODELOS

Apesar de todos os modelos apresentarem características de área total idênticas, é possível verificar algumas diferenças entre eles a partir da alteração de vedação e estrutura. Assim, todos os modelos foram elaborados com características similares, tais como os acabamentos internos e externos, esquadrias, cobertura e escadas. Já com relação as características do térreo, os dois primeiros modelos (em CLT e concreto armado e bloco cerâmico) foram elaborados com o mesmo material, a fim de mitigar os efeitos da umidade ascendente na estrutura de madeira. Já para o modelo em bloco de concreto estrutural, o térreo adotado foi idêntico aos demais pavimentos.

Assim, a partir da Tabela 8 é possível verificar as diferenças e similaridades dos modelos. Com relação à área útil de cada um dos modelos, é possível destacar algumas diferenças entre os mesmos, sendo o de concreto armado e bloco cerâmico aquele que apresenta menor dimensão útil, com 1.860,86 m<sup>2</sup> internos. Já o modelo em CLT tem 1.864,72 m<sup>2</sup> de área útil, com um ganho de pouco menos de 4 m<sup>2</sup>. Isto ocorre, principalmente, devido a sua redução na espessura dos painéis conforme a edificação cresce em altura e devido a suas paredes internas serem compostas de painéis de 12 cm, o que é inferior as paredes utilizadas internamente nos demais modelos.

Portanto, as principais alterações dos modelos têm relação com a diferença de características de vedação e estrutura. O primeiro e o último modelo (CLT e bloco de concreto) tem características autoportantes, já o segundo tem estrutura e vedação separados e moldados *in loco*. No modelo em CLT, as alterações de espessura dos painéis externos e a adoção de painéis com 12 cm de espessura para os painéis internos são determinantes para a redução do consumo de matéria prima, neste caso de madeira. Já para os demais modelos, como não há a possibilidade de redução de espessura das paredes, consequentemente, o consumo de material em todos os pavimentos é idêntico.

Todavia, pode ser levantado como ponto positivo que a não redução de espessura possibilita que todos os pavimentos apresentem a mesma condição térmica, em virtude da idêntica troca de calor com o exterior. Já o modelo em CLT pode apresentar valores alterados por pavimento e, por fim, caracterizar andares de maior conforto e reduzido consumo térmico em relação àqueles de andares mais altos.

TABELA 8 – COMPARATIVO ENTRE MATERIAIS UTILIZADOS NOS TRÊS MODELOS (CLT, CONCRETO E BLOCO CERÂMICO E BLOCO DE CONCRETO ESTRUTURAL)

CLT		Concreto armado+ Bloco cerâmico		Bloco de concreto
Habitação social multifamiliar CUB R8-B (SINDUSCON MG, 2007- adaptada)				
Tipo		8 (T+ 7)		
Pavimentos		4		
Apartamentos por andar		2610,10		
Área construída (m²)		1864,72		
Área útil (m²)		1864,72	1860,86	1860,86
Fundação		Concreto armado (moldado in loco)- conforme demanda estrutural		
Térreo		Concreto armado (vigas e pilares moldados in loco) e vedação em bloco cerâmico (largura- 14 cm)		Bloco de concreto grauteado
Escadas		Concreto armado moldado in loco		
Estrutura vertical		Painéis de CLT (conforme especificado em vedação vertical)	Sistema de vigas (14x40cm) e pilares (15x40cm) em concreto armado moldados in loco	Bloco de concreto grauteado
Estrutura horizontal		Painéis de CLT (espessura: 14cm, 5 camadas)	Lajes em concreto armado moldadas in loco (10cm)	
Vedação vertical	Núcleo estruturante e Caixa d'água	Painéis de CLT (espessura: 18cm, 5 camadas)	Bloco cerâmico 29x19x14 cm (Deitado: 19cm de largura)	Bloco de concreto vazado 19x19x39 cm (19cm de largura)
	Pavto. 01 e 02	Painéis de CLT (espessura: 18cm, 5 camadas)	Bloco cerâmico 29x19x14 cm (14cm de largura)	Bloco de concreto vazado 14x19x39 cm (14cm de largura)
	Pavto. 03, 04 e 05	Painéis de CLT (espessura: 16cm, 5 camadas)		
	Pavto. 06 e 07	Painéis de CLT (espessura: 14cm, 5 camadas)		
	Interna	Painéis de CLT (espessura: 12cm, 5 camadas)		
Acabamento	Interno-vertical	Placas de gesso cartonado+ pintura a base d'água branca		
	Interno-horizontal	Superior: Cerâmica+ argamassa de assentamento e regularização; Inferior: Placas de gesso cartonado+ pintura a base d'água branca		
	Externo	Fachada ventilada, sendo, do interior para o exterior: membrana hidrófuga (apenas para CLT), EPS (30mm), camada de ar (20mm) + estrutura de alumínio para fixação dos painéis (50x50x3mm), placa de fibrocimento (20mm)		
Cobertura		EPS (30mm), argamassa de regularização, manta asfáltica (5 mm), argamassa e piso cerâmico		
Esquadrias	Janelas	Esquadria de alumínio+ vidro simples		
	Porta	Madeira		

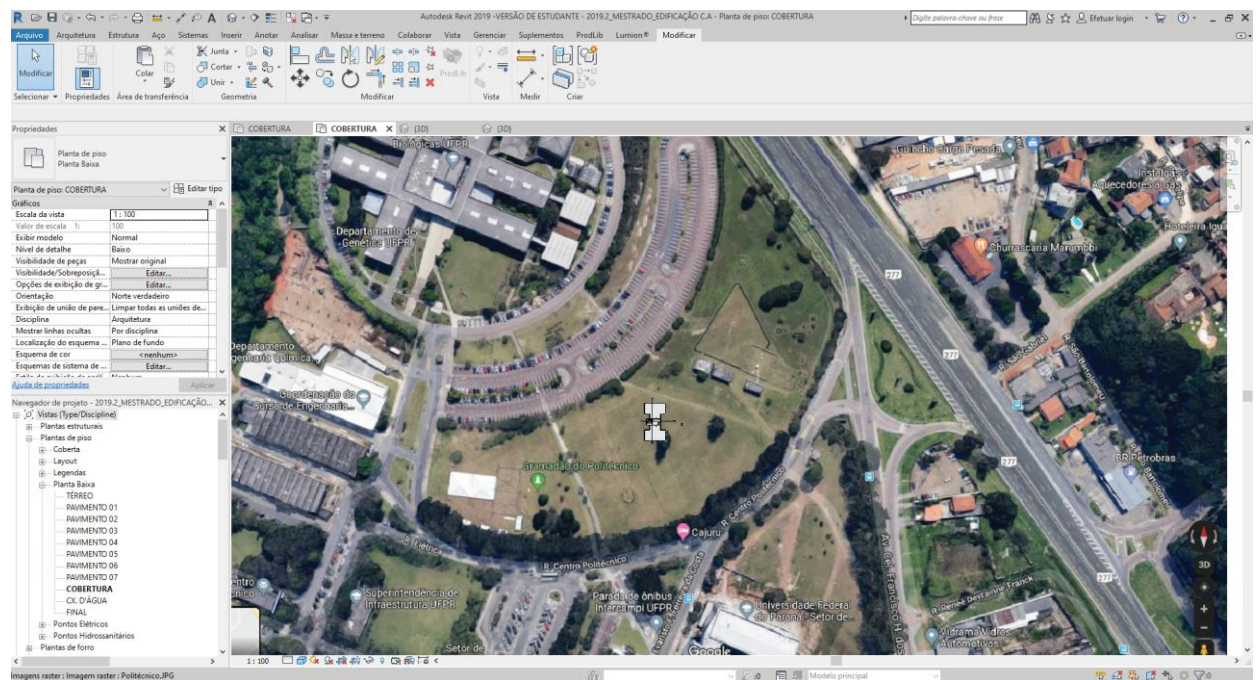
FONTE: A autora (2019).

#### 4.5 LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO MODELO

A fim de simular as distâncias percorridas para o transporte de materiais até o canteiro de obras e para avaliar o seu consumo energético a partir de sua configuração espacial, relação com a trajetória solar e finalmente, necessidade de condicionamento de ar em determinados

períodos do dia, o edifício vertical de oito (8) pavimentos foi posicionado no Centro Politécnico da UFPR, no bairro jardim das Américas, Curitiba – PR, com as seguintes coordenadas geográficas -25,44° e de longitude: -49,23°, conforme mostra a Figura 18.

FIGURA 18 – LOCALIZAÇÃO DA EDIFICAÇÃO HABITACIONAL DENTRO DO CENTRO POLITÉCNICO - UFPR



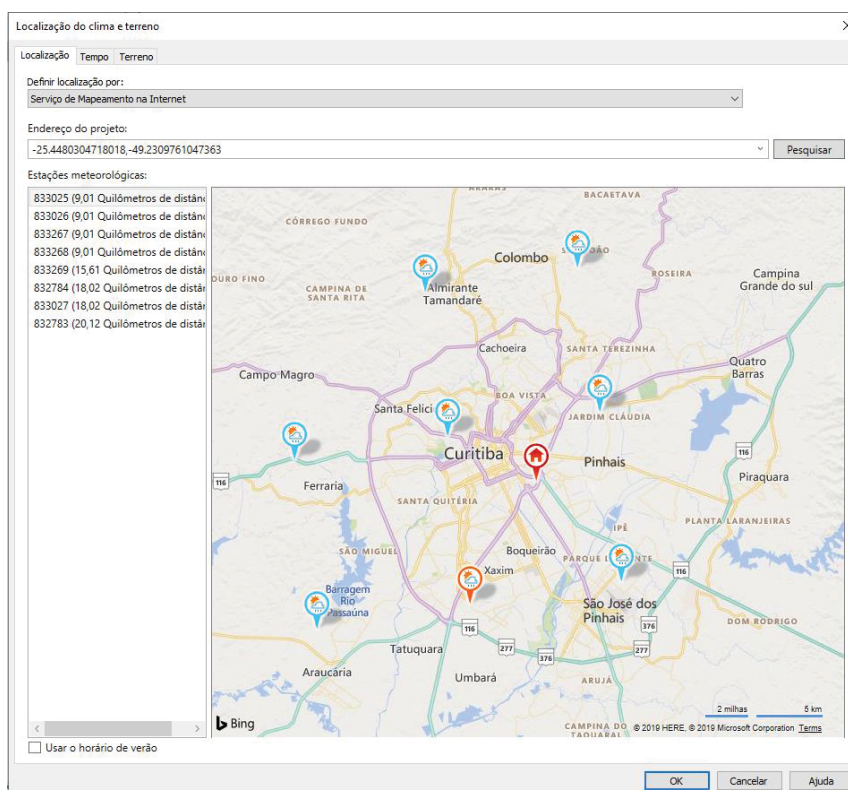
FONTE: A autora, adaptado de Google Maps (2019) em Revit (2019).

A edificação está posicionada com suas maiores fachadas posicionadas a leste e a oeste, tendo seu acesso posicionado na fachada leste. A escolha do posicionamento se deu em decorrência da possibilidade de um maior número de cômodos receberem a iluminação solar durante o dia. No local não foram consideradas interferências da vegetação ou de edificações no seu entorno, assim, não havendo sombreamento no local proposto.

Uma vez identificado o local de implantação da edificação, é necessário definir a estação meteorológica utilizada para inserção de dados com relação ao clima. A Figura 18 mostra a inserção no *Revit 2019* da edificação e a escolha da estação meteorológica utilizada como referência para os cálculos de simulação operacionais da edificação. Desta forma, com um *pin* vermelho e um símbolo de casa está o local da edificação, ainda no mapa, os *pins* em azul representam as estações meteorológicas mais próximas ao modelo e em laranja aquela escolhida para a simulação. Os dados coletados das estações meteorológicas estão baseados nos dados requeridos por ASHRAE (2009).



FIGURA 19 – LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DO PROJETO E DAS PRINCIPAIS ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS CADASTRADAS EM REVIT 2019



FONTE: A autora, via Revit (2019).

#### 4.6 DEFINIÇÃO DE SOFTWARES E BASE DE DADOS PARA ACV

Neste estudo o software eleito para a modelagem da edificação utilizada para simulação foi o *Autodesk Revit 2019*, devido a sua interface amigável e a compatibilidade com plugins de simulação de desempenho operacional, bem como de Avaliação de Ciclo de Vida.

Neste sentido, para a simulação do desempenho operacional da edificação foi considerado o consumo energético ao longo de um período de 50 (cinquenta) anos com relação a iluminação, equipamentos eletrônicos e aquecimento e resfriamento. Foram feitas as configurações dos materiais e as configurações dos espaços da edificação, ainda em *Revit 2019*, passando, posteriormente o modelo para o plugin *Green Building Studio* e, finalmente, simulando o consumo operacional por meio do *Insight 360*, ambos desenvolvidos pela *Autodesk*, e integrados ao *Revit* por meio de simulações feitas pela nuvem da *Autodesk*.

Todavia, antes de executar a simulação é necessário fazer as configurações específicas do modelo com relação ao uso da edificação, carga térmica dos materiais, ocupação dos ambientes, consumo de energia e iluminação, troca de ar e carga térmica por ocupante.

Já para a simulação de ACV, o plugin *Tally* foi utilizado devido a sua disponibilidade de licenças estudantil e facilidade de manuseio. Este plugin faz a ACV a partir da base de dados *Gabi*, utilizando banco de dados com valores de EPDs dos materiais para os Estados Unidos, no ano de 2017 (TALLY, 2019), sem que seja possível alterar valores e cálculos deste.

O *Tally* permite a elaboração da Avaliação de Ciclo de Vida de toda a edificação em todas as suas etapas, podendo as etapas serem analisadas em separado por seu relatório final. Dentre elas, aquelas que devem ser inseridas de maneira manual e estão relacionadas a fase operacional são as relativas à manutenção da edificação, bem como ao consumo energético dela ao longo de sua vida útil. Já o valor para a substituição de materiais é dado a partir da indicação da vida útil de cada material escolhido durante o processo de seleção.

Outra etapa que pode ser preenchida manualmente em *Tally* é a distância e meio de transporte utilizados para os materiais dentre a fábrica e o canteiro de obras (A4), permitindo que fatores regionais sejam levados em consideração com relação a disponibilidade destes. Também os dados relativos à construção ou montagem da edificação devem ser inseridos de modo manual e seu levantamento precisa ser elaborado por meio do uso de outro modo de simulação. Para a fase final da edificação, relacionada ao destino final dos materiais após a desmontagem da edificação, não é possível determinar qual é o destino destes materiais, sendo este determinado de maneira automática pelo plugin, com base em *Gabi*.

#### 4.7 COLETA DE DADOS

Uma vez que o plugin *Tally* tem uma base de dados fixa e não permite alterações relativas aos cálculos utilizados na composição da ACV, é necessário que as etapas que podem ser modificadas, complementadas ou que são opcionais sejam completadas conforme características regionais de consumo. Neste sentido, os itens a seguir são aqueles que tiveram que ser elaborados de modo manual a fim de complementar as informações em *Tally*:

- Características físicas e térmicas dos materiais que compõe a edificação;
- Uso e ocupação dos ambientes da edificação;
- Distância entre a fábrica e o canteiro de obras, bem como meio de transporte utilizado;
- Manutenção e troca dos materiais ao longo do ciclo de vida da edificação;

A etapa relativa à montagem ou construção também deve ser inserida manualmente. Neste sentido, para que este dado seja introduzido aos valores de cálculo seria necessário um



levantamento estimativo do tempo de obra de uma edificação em CLT no Brasil, o que tornaria o levantamento falho, por conta da falta de informações com relação ao processo de montagem da edificação em CLT, bem como dos resíduos gerados.

Neste sentido, é sabido que o CLT passa por um processo de montagem em canteiro, enquanto que, uma edificação em alvenaria em bloco cerâmico e concreto moldado *in loco* ou em blocos de concreto estrutural devem ser construídas no canteiro de obras e necessitam um tempo relativamente mais alto, isto se tornar uma importante característica a ser levada em consideração em uma obra pré-fabricada. Para tanto, é necessário que estes levantamentos sejam feitos de maneira precisa e considerando todos os fatores que podem influenciar no processo de montagem ou construção da edificação, tais como mão de obra, uso de equipamentos, tempo, desperdício, resíduos, dentre outros. Portanto, neste trabalho, a etapa da construção ou montagem da edificação (A5) não foi considerada.

Outro ponto importante é o fato de que para fins de cálculo de consumo energético durante a fase operacional da edificação, todo o invólucro construído foi levado em consideração, visto que itens como os acabamentos verticais e horizontais desempenham papel fundamental neste cálculo. Já para o cálculo da ACV foram considerados apenas os materiais utilizados para estrutura e vedação dos dois modelos, visto que os materiais de acabamento e de esquadrias serão os mesmos para os três modelos. Conclui-se, então, que a ACV da edificação deve comparar o mesmo modelo, com três sistemas construtivos distintos, sendo que apenas os seguintes itens construtivos devem ser levados em consideração: fundação, estrutura e vedação.

Vale ressaltar que a base de dados utilizada pelo plugin *Tally*, o *Gabi* que é de origem alemã, mas que tem uma cobertura mundial, levando em consideração o ciclo de vida dos produtos de maneira global e pode ser utilizado para diferentes fins, tais como ACV de produtos, sistemas, edificações e serviços (CAMPOLINA; SIGRIST; MORIS, 2015). Apesar disso, no site do plugin *Tally* é informado que os dados utilizados para a ACV dos materiais pretendem representar os valores dos Estados Unidos, ainda que em alguns casos seja necessário usar dados de proxy, quando os dados representativos estavam indisponíveis (TALLY, 2019).

#### 4.7.1. Características físicas e térmicas dos materiais

Para a simulação do consumo energético durante a fase operacional da edificação em CLT foi necessário adotar valores para a densidade de massa aparente ( $\text{kg/m}^3$ ), condutividade térmica ( $\text{W/(m.K)}$ ) e calor específico ( $\text{KJ/(kg.K)}$ ) para os materiais que compõe os dois modelos comparativos (CLT e concreto armado e blocos cerâmicos), conforme descrição da Tabela 08.

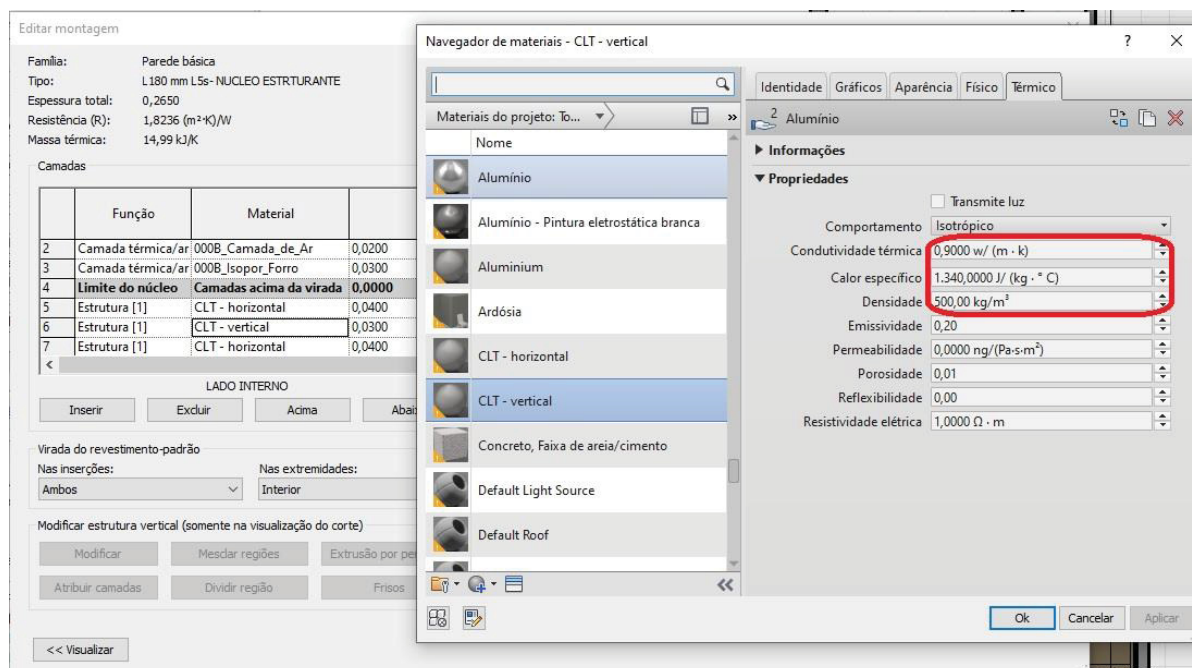
TABELA 9 – PROPRIEDADE TÉRMICA DOS MATERIAIS

	Densidade de massa aparente (r) ( $\text{kg/m}^3$ )	condutividade térmica (l) ( $\text{W/(m.K)}$ )	calor específico (c) ( $\text{kJ/(kg.K)}$ )	resistência térmica ( $\text{m}^2.\text{K/W}$ )
ALUMÍNIO	2700	230	0,88	-
ARGAMASSA <sup>1</sup>	1950	1,15	1	-
BLOCO CERÂMICO <sup>1</sup>	1450	0,9	0,92	-
BLOCO DE CONCRETO <sup>1 2</sup>	2137	1,48	1	0,13
CAMADA DE AR (PAREDES) <sup>1</sup>	-	-	-	0,17
CERÂMICA <sup>3</sup>	1600	0,9	0,92	-
CONCRETO <sup>1</sup>	2300	1,75	1	-
EPS <sup>1</sup>	25	0,04	1,42	-
MADEIRA MACIÇA <sup>1</sup>	500	0,13	1,34	-
PLACA DE FIBROCIMENTO <sup>1</sup>	1800	0,65	0,84	-
PLACA DE GESSO <sup>1</sup>	750	0,35	0,84	-
MANTA ASFALTICA <sup>1</sup>	1600	0,43	0,96	-
VIDRO COMUM <sup>1</sup>	2500	1	0,84	-

FONTE: ABNT (2005a) <sup>1</sup>, relatório n. 282/2014 CB3E – UFSC (2014) <sup>2</sup>, PBQP-H (2018a) <sup>3</sup>.

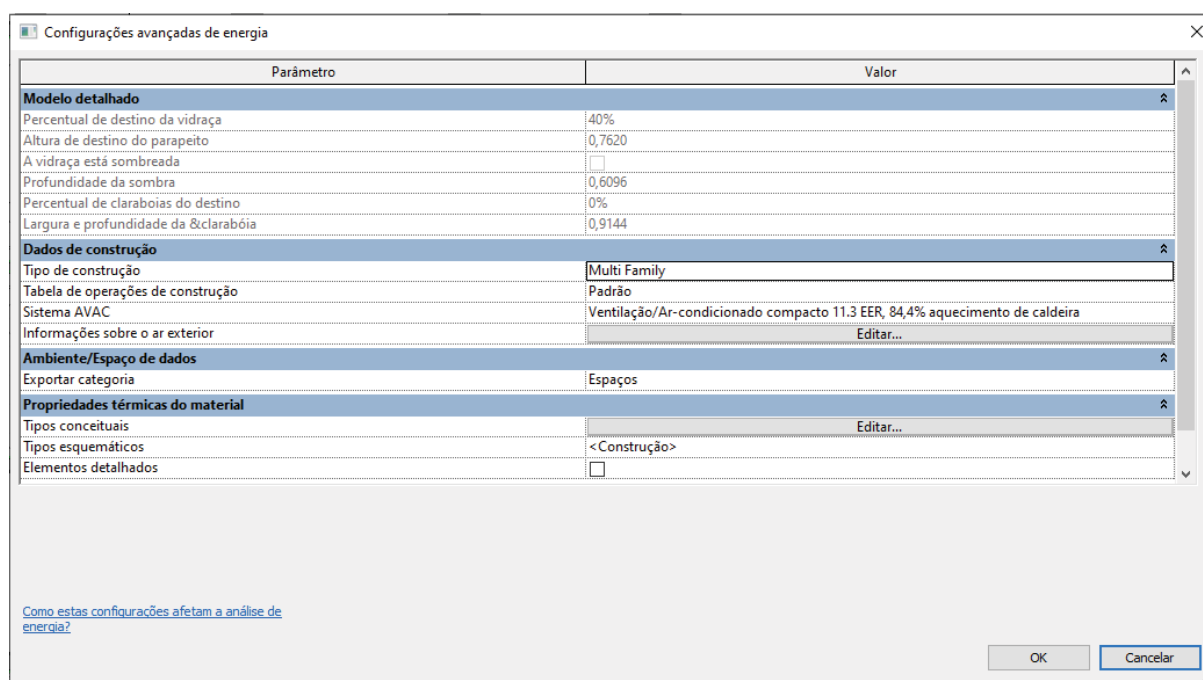
É ainda importante ressaltar que não há valores determinados para o comportamento térmico do CLT produzido no Brasil, neste sentido, o valor adotado foi determinado pela determinação da densidade de massa aparente dos painéis (GREENSPEC, 2019) e a partir deste, retirados da NBR 15220-2 (ABNT, 2005a) a condutividade térmica e o calor específico. Ainda o piso cerâmico teve seu valor retirado de do PBQP-H (2018a). Já com relação ao bloco de concreto, foram utilizados os dados encontrados no relatório técnico n. 282/2014 CB3E-UFSC (2014) para condutividade térmica e densidade de massa aparente, enquanto os valores de calor específico e resistência térmica foram tirados de ABNT (2005a).

FIGURA 20 - INSERÇÃO DE CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DOS MATERIAIS EM REVIT 2019.



FONTE: A autora, via Revit (2019).

FIGURA 21 - CONFIGURAÇÃO DE USO DA EDIFICAÇÃO E CONDICIONAMENTO DE AR



FONTE: A autora, via Revit (2019).

Ainda é importante durante o processo de simulação do consumo energético da edificação durante a fase de operação que seja definido o uso da edificação e que, consequentemente, sejam trazidos os valores relativos a trocas térmicas com o exterior a partir da proporção das aberturas. É ainda nessa fase que o sistema de aquecimento e arrefecimento

deve ser definido. Neste caso, o *Revit 2019* tem apenas opções pré-definidas de sistemas de condicionamento do ar, sendo escolhida a opção “ventilação/ ar-condicionado compacto 11.3 EER, 84,4% aquecimento de caldeira”, conforme pode ser visto na Figura 20.

#### 4.7.2 Uso e ocupação dos ambientes

Os valores adotados para o uso e ocupação dos ambientes foi feito de acordo com os valores estipulados na RTQ-R elaborada pelo PBE Edifica (2012) e adaptados conforme os dados de entrada aceitos em *Revit (2019)*, uma vez que o programa não permite criar um padrão de ocupação diferente durante os dias de semana e final de semana, mas sim, de um padrão de ocupação diário, sendo assim necessário adaptar as médias de ocupação semanal de luz e equipamentos elétricos para uma média de horas de consumo diário, conforme a Tabela 10.

Não foram levadas em consideração a energia gasta pelo elevador e nem pela iluminação dos corredores de acesso durante o cálculo. Já para o cálculo das potências por cômodo, foram separados os equipamentos utilizados em cada cômodo e calculadas suas equivalências conforme horas de uso diário e potência por metro quadrado do ambiente, conforme a necessidade de inserção de dados em *Revit*, demonstrados na Tabela 11.

Ainda nesta etapa foi determinado a altura do ambiente, a fim de que o programa calcule o volume de ar de cada ambiente e insira dados quanto a condição de controle térmico de cada ambiente, conforme especificado na Tabela 12.

TABELA 10 - PADRÃO DE OCUPAÇÃO DOS AMBIENTES

Ambiente	Horas de uso diário (utilizado para carga térmica do corpo humano)	Número de ocupantes	Horas de uso de iluminação	Potência instalada de iluminação
Quartos	Ligado das 21:00 PM às 8:00 AM	2	Ligado das 20:00 PM às 23:00 PM	5 W/m <sup>2</sup>
Salas	Ligado das 17:30 PM às 21:00 PM	4	Ligado das 16:30 PM às 22 PM	6 W/m <sup>2</sup>
Cozinha	Ligado das 20:00 PM às 21:00 PM	1	Ligado das 20:00 PM às 21:00 PM	6 W/m <sup>2</sup>
Lavanderia	Ligado das 20:00 PM às 21:00 PM	1	Ligado das 19:30 PM às 20:00 PM	6 W/m <sup>2</sup>
Banheiro	Ligado das 19:00 PM às 20:00 PM	1	Ligado das 19:00 PM às 20:00 PM	5 W/m <sup>2</sup>

FONTE: A autora, adaptado de PBE Edifica (2012) para os dados de entrada do Revit (2019).

TABELA 11 - CONSUMO MÉDIO POR EQUIPAMENTO

Ambiente	Equipamento eletrônico	Dados da norma			Média utilização/dia (horas)	Área média (m²)	Dados inseridos no modelo	
		N. de equip.	Potência (W)	Dias de uso estimado no mês			Carga de potência (W/m²)	Horas de uso de potência
Quarto (2)	Televisão	1	83	30	2,5	10	8,3	Ligado das 20 PM às 22:30 PM
Sala	Televisão	1	83	30	5			
	Computador	1	63	30	8	17	11,66	Ligado das 18:30 PM às 22:30 PM
	Telefone s/fio	1	3	30	24			
Cozinha	Geladeira	1	55	30	24	6,3	9,17	Ligado 24 horas
	Fogão	1	66,7	30	1			
Lavanderia	Maquina de lavar	1	147	12	1	4,45	33	Ligado das 19:30 PM às 20:00 PM
Banheiro	Chuveiro	1	4500	30	1	3	1500	Ligado das 19:00 PM às 20:00 PM

FONTE: PROCEL (2015) para os dados de entrada do Revit (2019).

Cada cômodo representa um espaço criado no software e este é configurado pela barra de propriedades dos espaços criados, conforme mostram os exemplos da Figura 22 e Tabela 12.

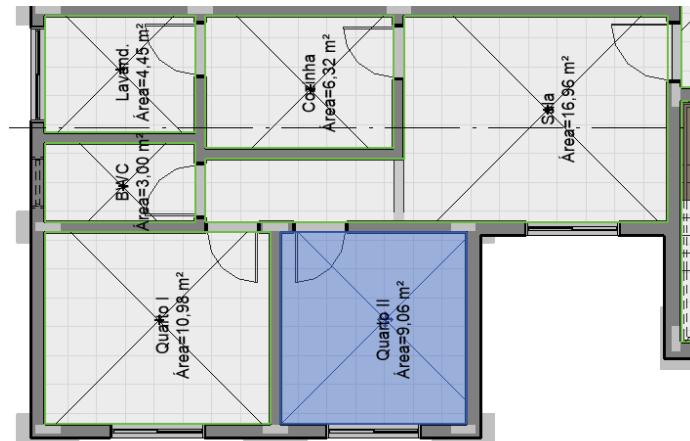
Estão grifados em amarelo na Figura 23 quais os itens modificados para que a configuração de consumo esteja em conformidade com as diretrizes de consumo energético das edificações (PBE EDIFICA, 2012; PROCEL, 2015). No entanto, alguns valores, tais como o ganho de calor latente e calor sensível por pessoa não foram alterados, uma vez que são automaticamente configurados em conformidade com a normativa americana de ganho de calor em ambientes fechados (ASHRAE, 2009).

TABELA 12 – CONDIÇÃO DE ACLIMATAÇÃO DOS AMBIENTES RESIDENCIAIS

Condição de aclimação	
Quartos	Aquecido e resfriado
Sala	Aquecido e resfriado
Cozinha	Ventilação natural
Lavanderi	Ventilação natural
Sanitário	Ventilação natural
Hall de en	Ventilação natural
Elevador	Ventilação natural
Escadas	Ventilação natural

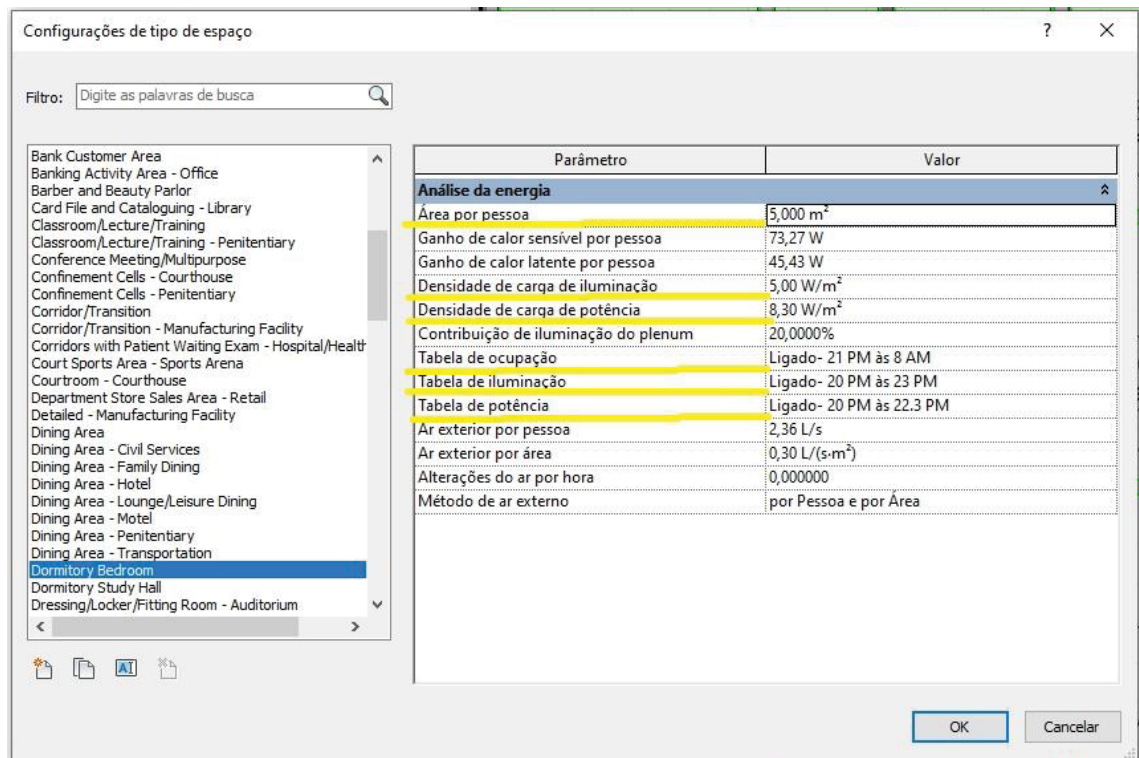
FONTE: A autora (2019).

FIGURA 22 – CONFIGURAÇÃO DE ESPAÇOS



FONTE: A autora, via Revit (2019).

FIGURA 23 - CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS DOS ESPAÇOS INTERNOS



FONTE: A autora, via Revit (2019).

#### 4.7.3 Distâncias entre a fábrica e o canteiro de obras

Como dito no item 4.7, para o cálculo da ACV devem ser levados em consideração apenas a estrutura e a vedação de ambos os modelos. Neste sentido, a Tabela 13 apresenta as distâncias da fábrica destes materiais até o canteiro de obras no Centro Politécnico da UFPR.

O critério utilizado para seleção da fábrica de cada componente foi feito com base na listagem de empresas cadastradas no PSQ, desenvolvido pelo PBQP-H (2018b). O programa seleciona empresas que estejam em conformidade técnica com os padrões esperados para a construção civil nacional, gerando um ambiente de isonomia competitiva, padrão de produção e, conseqüentemente, redução de custo. Foi utilizado como critério de seleção fabricantes que se encontrassem em maior proximidade com o local do canteiro de obras. O CLT não foi encontrado nesta listagem de empresas, sendo eleita para fins de cálculo de distância a fábrica de painéis localizada na cidade de Suzano – SP.

O consumo energético para o transporte será considerado por meio do uso de caminhões e os valores de emissão e gasto energéticos por caminhão são dados por *Tally* (2019).

TABELA 13 - DADOS PARA CÁLCULO DE TRANSPORTE (FÁBRICA – CANTEIRO DE OBRAS)

Material e componente	Localização da fábrica (latitude e longitude)	Localização do canteiro de obras	
		(latitude e longitude)	Distância (km)
Aço <sup>1</sup>	Araçariguama – SP (-23.43, -47.08)		440
Bloco cerâmico <sup>1</sup>	Curitiba - PR (-25.58, -49.29)	Centro Politécnico UFPR Curitiba – PR	20
Bloco de concreto <sup>1</sup>	Curitiba - PR (-25.60, -49.32)		25
Cimento/ Concreto <sup>1</sup>	Campo Largo – PR (-25.459, -49.60)	(-25.451311, -49.23)	50
CLT <sup>2</sup>	Suzano - SP (-23.66, -46.33)		465

FONTE: Google Maps (2019) a partir dos dados de PBQP-H (2018b) <sup>1</sup> e Google <sup>2</sup>

#### 4.7.4 Manutenção e troca de materiais ao longo do ciclo de vida

A NBR 15575:1 (ABNT, 2013) estipula valores relativos ao tempo necessário de manutenção dos materiais e componentes da edificação. Neste sentido, a Tabela 14 representa o número de anos que cada componente construtivo deverá resistir, sendo, assim, levado em consideração durante o cálculo do fator de troca dos materiais utilizados para a composição do modelo simulado.



No entanto, é importante que seja levado em consideração que apenas a estrutura e a vedação foram computadas para fins de cálculo de ACV, neste sentido, o tempo de duração destes deverá estar em conformidade com a norma para a estrutura (50 anos) e para as vedações verticais tanto internas como externas, não devem ocorrer trocas de material durante o ciclo de vida da mesma, visto que no modelo em CLT a vedação desempenha também papel estrutural e que no modelo em concreto armado mais bloco cerâmico é possível também prever que as vedações em bloco cerâmico devem resistir aos 50 anos de uso previstos para a edificação.

Assim, o fator de troca e manutenção de material e componentes não é um fator determinante para o cálculo de ACV em nenhum dos três modelos simulados visto que é considerado que tanto sua estrutura quanto a sua vedação deve resistir aos 50 anos de vida útil previstos em projeto.

TABELA 14 – VIDA ÚTIL DE PROJETO (VUP) DOS COMPONENTES DA EDIFICAÇÃO

Sistema	VUP mínima (anos)
Estrutura	50
Pisos internos	13
Vedação vertical externa	40
Vedação vertical interna	20
Cobertura	20
Hidrosanitários	20

FONTE: ABNT (2013).

Para o modelo em CLT, considera-se a edificação autoportante, o que significa que estrutura e vedação são a mesma coisa, bem como para aquela em bloco de concreto. Já para o modelo em concreto armado e blocos cerâmicos, optou-se por estipular que as vedações verticais devem resistir também aos 50 anos de vida útil previstos para a edificação, por conta das características físicas do bloco cerâmico.

Já para os pisos, acabamentos e esquadrias, não houve uma estipulação de tempo de vida útil, uma vez que todos os modelos terão o mesmo acabamento e que, portanto, estes elementos não serão computados para fins desta ACV.

## 5 AVALIAÇÃO DO CONSUMO OPERACIONAL DA EDIFICAÇÃO

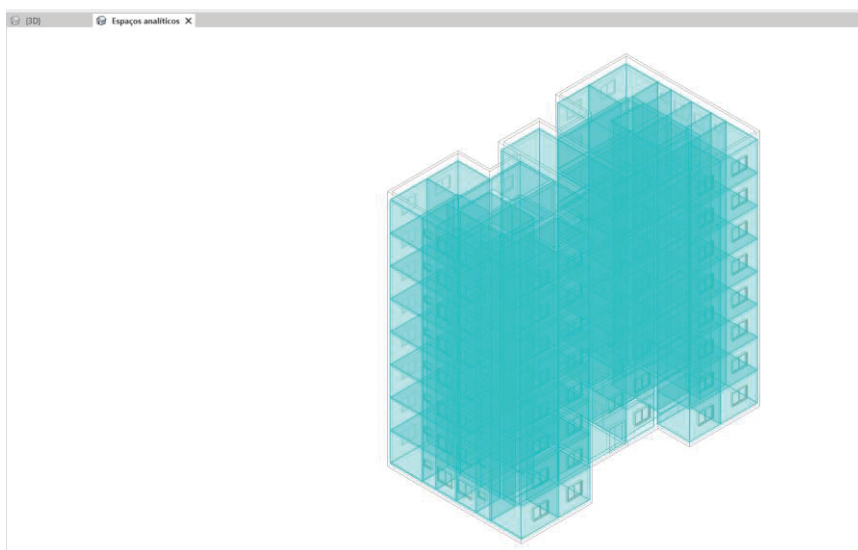
A partir da elaboração e configuração dos modelos em *Revit*, foi possível fazer sua análise de comportamento termo energético e consumo de energia ao longo do período de um ano para a cidade de Curitiba por meio do uso de plugins desenvolvidos pela *Autodesk*. A interface escolhida foi o *Autodesk Green Building Studio* (2019) e o plugin *Insight 360* (2019), que funciona por meio de computação paralela em nuvem.

Desta forma, é de interesse que além da modelagem da edificação, parâmetros utilizados para a simulação, tais como a ocupação e iluminação dos cômodos, incidência solar, dentre outros sejam inseridos, de acordo com os parâmetros estabelecidos no Capítulo 4, para que assim o processo de análise seja descrito.

### 5.1 ENVIO DO MODELO PARA A NUVEM E PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO

A partir da elaboração do modelo detalhado da edificação e definidos os parâmetros, é possível gerar o modelo analítico de energia ainda em *Revit* por meio do uso do plugin do *Insight 360*, conforme mostra a Figura 24. Este modelo analítico de energia é então enviado para a nuvem da Autodesk e analisado de acordo com seus parâmetros e outros que poderão ser posteriormente alterados.

FIGURA 24 – MODELO ANALÍTICO DE ENERGIA



FONTE: A autora, via Revit (2019) e plugin Insight 360 (2019).

Após a análise em nuvem, é possível alterar diversos parâmetros para avaliar o desempenho da edificação de acordo com critérios definidos por quem analisa o projeto, conforme descritos abaixo.

Dentre os critérios que podem ser alterados durante a avaliação do modelo em nuvem estão a orientação da edificação, percentual de área envidraçada (*WWR- Window Wall Ratio*), sombreamento das janelas (*Window Shades*), propriedades térmicas do vidro (*Window Glass*), sendo os três últimos critérios a serem especificados para cada uma das quatro orientações solares. Estes parâmetros foram deixados do modo como vieram do modelo.

FIGURA 25 - EXEMPLO DE BARRA DE INTERAÇÃO PARA ALTERAR OS PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO DO MODELO

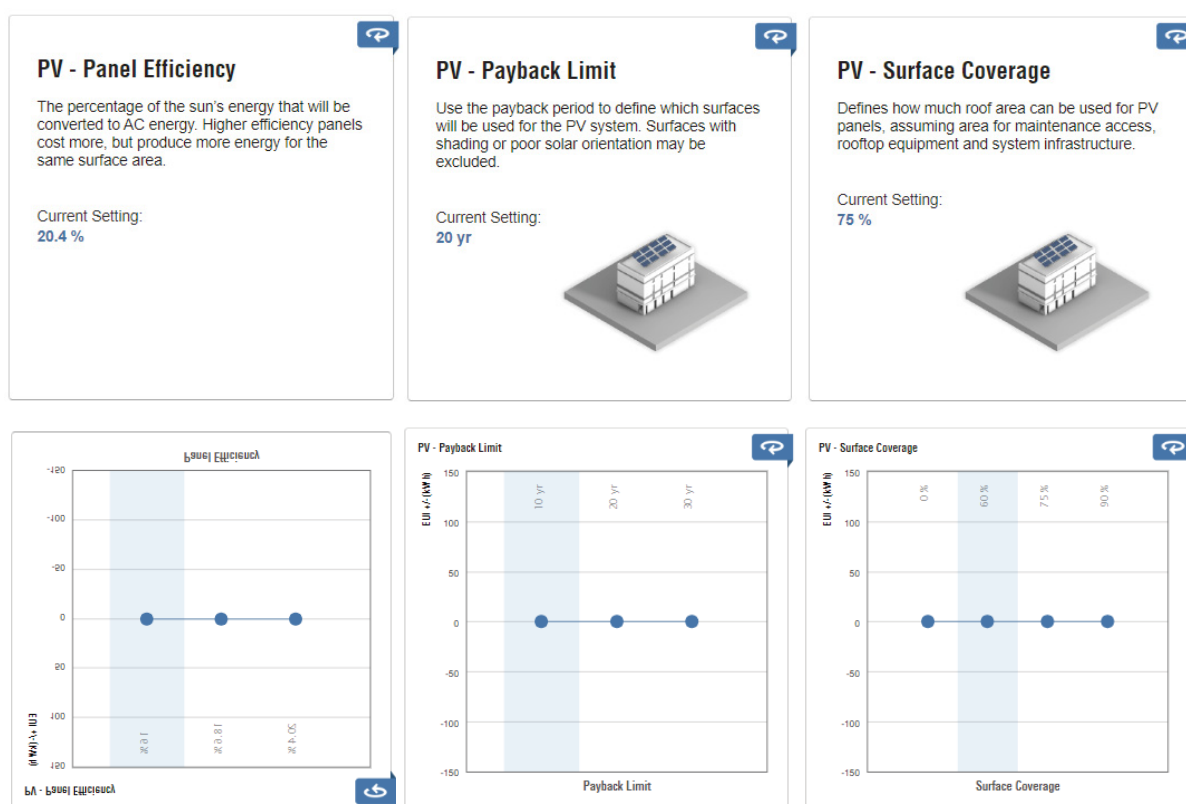


FONTE: Insight 360 (2019)

Além dos critérios de alteração com relação as áreas envidraçadas, também é possível alterar características das paredes, telhado e infiltração de ar. Como estes elementos construtivos foram determinados durante a modelagem da edificação utilizando as características térmicas dos materiais, conforme descrito na Tabela 9, optou-se por manter as definições de BIM, principalmente quanto ao esquema de utilização da edificação pelas horas de uso, conforme as Tabelas 10 e 11.

Ainda é possível alterar o consumo energético da edificação por meio de sua eficiência luminosa, controle de ocupação diária, eficiência das tomadas, tipo de equipamento de resfriamento e aquecimento dos ambientes (HVAC) e o cronograma operacional, com as horas de uso diários. Assim, os valores de eficiência das tomadas foram alterados para 6,46 W/m<sup>2</sup> e a escolha dos equipamentos de HVAC foram alterados para aquele de menor consumo energético, que corresponde ao item ASHARE *Package Terminal Heat Pump*.

FIGURA 26 - CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA A UTILIZAÇÃO DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NA COBERTURA DA EDIFICAÇÃO



FONTE: Insight 360 (2019)

O último critério de alteração, que tem relação com a produção e a utilização de energias alternativas por meio da instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura da edificação foi alterada nesta barra de interação virtual online do *Insight 360*. Neste sentido, os itens a serem configurados com relação ao uso de painéis fotovoltaicos são a eficiência dos painéis, o tempo de retorno e a superfície de cobertura.

Para estes critérios foi utilizada a eficiência de 16% para os painéis, o tempo de retorno de 10 anos e a utilização de 60% da superfície da cobertura para a instalação de painéis de geração de energia solar, conforme pode ser visto na Figura 26, considerando, assim, a redução

de consumo energético em função da instalação de painéis fotovoltaicos na cobertura da edificação.

## 5.2 CONSUMO TERMO ENERGÉTICO DA EDIFICAÇÃO DURANTE A FASE OPERACIONAL

Após a escolha destes critérios de avaliação termo energética é possível fazer a leitura final do consumo da edificação para um ano durante a sua fase operacional por meio do site da *Autodesk Green Building Studio* (2019), sendo o resultado do consumo dado em kWh para a energia elétrica e em MJ para os combustíveis ou gás, conforme pode ser visto pela Tabela 15.

O resultado também pode ser visualizado conforme os itens de seleção mostrados pelas Figuras 25 e 26 são alterados, neste caso em uma escala de kWh/m<sup>2</sup>/ano ou ainda em unidades de custo, por meio da leitura de uma escala de consumo, em virtude da escolha de itens múltiplos, mostrando o máximo, mínimo e média gasta com a combinação dos itens, visto que o uso deste simulador é mais indicado para a comparação entre diferentes modelos de edificação e para escolha de alternativas volumétricas durante a fase preliminar de projeto.

No caso da simulação para este trabalho, o resultado não teve uma escala de variação, mas sim, um valor final, possibilitando a comparação de todos os resultados obtidos e fazendo a multiplicação deste valor pela área considerada pelo *Insight 360*, com valor em kWh/ano.

TABELA 15 - CONSUMO ENERGÉTICO PARA OS DIFERENTES MODELOS

	Consumo		
	Eletricidade (kWh)	Combustível/ Gás (MJ)	Consumo anual (kWh/ano)
CLT	307.607	707.024	240.700
Conc. Armado + Bloco Cerâmico	314.609	652.766	250.660
Bloco de Concreto	314.190	628.664	255.640

FONTE: A autora, com base nos resultados em Green Building Studio e Insight 360 (2019).

O resultado obtido da simulação mostra que o modelo com melhor desempenho e menor consumo de energia elétrica durante a fase operacional da edificação é aquele em CLT. Já o modelo em blocos de concreto obteve o pior resultado comparativo entre as três alternativas, no entanto todos os modelos têm um consumo elétrico muito próximo entre eles.

No entanto, se analisado o consumo de gás, o modelo em CLT tem um consumo bastante superior àqueles que utilizam as outras técnicas construtivas analisadas. É importante

verificar ainda que os totais obtidos pela simulação não devem ser vistos como valores absolutos, mas comparados em termos relativos e em percentuais de diferença, uma vez que existe certa dificuldade em rastrear como estes resultados são obtidos e, novamente, em analisar quais os reais fatores que mais pesaram para tais resultados.

Assim, conforme mencionado no item 4.6, é possível que por conta da redução na espessura dos painéis de CLT nos pavimentos mais altos, também as trocas térmicas tenham sido mais assentuadas naqueles pavimentos, principalmente durante o período de inverno, evidenciando o aumento de consumo de energia para aquecimento. Desta forma, a vantagem apresentada em relação a redução de material de vedação e estrutura possibilitada pela capacidade estrutural do material pode ser uma desvantagem com relação ao consumo de combustíveis para aquecimento.

O trabalho de Dong et al. (2019), analisa o desempenho operacional da edificação a partir da energia de aquecimento e arrefecimento para diversas regiões bioclimáticas da China e conclui que o CLT como material de vedação é mais adequado para atender regiões de climas predominantemente frios, sendo que o seu desempenho em locais quentes pior. Desta forma, o material é indicado para regiões onde há a necessidade de aquecimento da edificação, enquanto para aquelas mais quentes, o desempenho em relação ao concreto armado é inferior. Isto é explicado, segundo o artigo, por biomateriais, como a madeira, causarem um superaquecimento devido a seus valores mais baixos de massa térmica.

Já na cidade de Quebec – Canadá, Rouleau, Gosselin e Blanchet (2018) desenvolveu um estudo comparativo com um edifício de habitação social a fim de comparar o desempenho da edificação de acordo com os materiais de vedação e revestimento. Esta edificação foi elaborada em sua metade em CLT e a outra parte em paredes de montagem leve. Os resultados apontam para a mesma necessidade de aquecimento que durante a fase operacional do edifício em ambas as edificações.

Durante a fase operacional da edificação o CLT aparece como um material que tem menores demandas energéticas do que outras estruturas leves. Isso pode ser entendido como a energia salva devido a massa térmica criada pela estrutura maciça da Madeira Laminada Cruzada Colada. Contudo, se o CLT for comparado com materiais mais pesados e de maior efeito de massa térmica, o seu desempenho é menos favorável.

Apesar disso, dentro de ambientes que tem superfícies amadeiradas, as pessoas tendem a se sentir mais aquecidas do que em contato com outros materiais, sendo possível reduzir o consumo de energia para controle de temperatura, pois a percepção térmica é alterada a partir da percepção dos materiais de contato das superfícies internas da edificação. Além disso, a

madeira maciça exposta no interior fornece o efeito de controle de umidade, ajudando o microclima interno e resultando em uma redução do consumo de energia por aquecimento.

Para Curitiba, localizada na Zona Bioclimática 1, tem a presença de invernos bem definidos e de verões amenos, em conjunto com as características dos painéis em relação a espessura, justificam o maior consumo do modelo em CLT para combustíveis, comumente utilizados para o aquecimento dos ambientes. Enquanto há uma leve redução no consumo elétrico, justificada pela reduzida necessidade de condicionamento de ar durante o período de verão, uma vez que as trocas durante o período são reduzidas por conta das condicionantes climáticas locais.



## 6 AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

A simulação da ACV também em BIM é uma das premissas deste trabalho, a fim de explorar ferramentas disponíveis em BIM para sustentabilidade das edificações e para avaliação do impacto das fases de seu ciclo de vida. Desta maneira, o plugin em BIM escolhido foi o *Tally* (2019) devido a sua integração com o software *Autodesk Revit* (2019), disponibilidade de versão estudantil, base de dados global e facilidade de interação.

Neste sentido, a partir das modelagens da edificação, a opção de avaliar por meio da ACV de maneira comparativa apenas sua estrutura e vedação surgiu para que outros fatores que deveriam ser similares para os três modelos não interferissem durante a interpretação da análise de impacto de cada material e categoria. Dentre os itens excluídos da avaliação estão os acabamentos de paredes, lajes e pisos, bem com esquadrias, uma vez que estes materiais são idênticos para as três opções construtivas avaliadas.

A prática de fazer a ACV apenas da estrutura ou da estrutura mais vedação das edificações é comum, visto sua importância e proporção de impacto na análise durante a fase pré-operacional, neste sentido, diversos estudos buscam avaliar o impacto pré-operacional da edificação avaliando principalmente sua estrutura ou estrutura mais vedação (AZZOUZ et al., 2017; KUMAR PAL et al., 2017; MONCASTER et al., 2018; TAKANO; HUGHES; WINTER, 2014a; TAKANO et al., 2015a; TAKANO et al., 2015b). Ainda é possível inferir que em muitos destes estudos estão considerados estrutura a vedação conjuntamente, visto que o CLT é autoportante, e que, portanto, não é possível distinguir entre aquilo que é estrutura e aquilo que é vedação.

Azzouz et al. (2017) ainda cita que cerca de 10% da emissão de GWP e 7% da emissão de carbono de origem fóssil são advindos da estrutura, enquanto que o envelope e o perímetro da edificação representam apenas 2 a 3% dos gastos totais da edificação, em uma análise de todas as fases da ACV, sendo a fase operacional aquela de maior consumo energético e emissão de gases de efeito estufa.

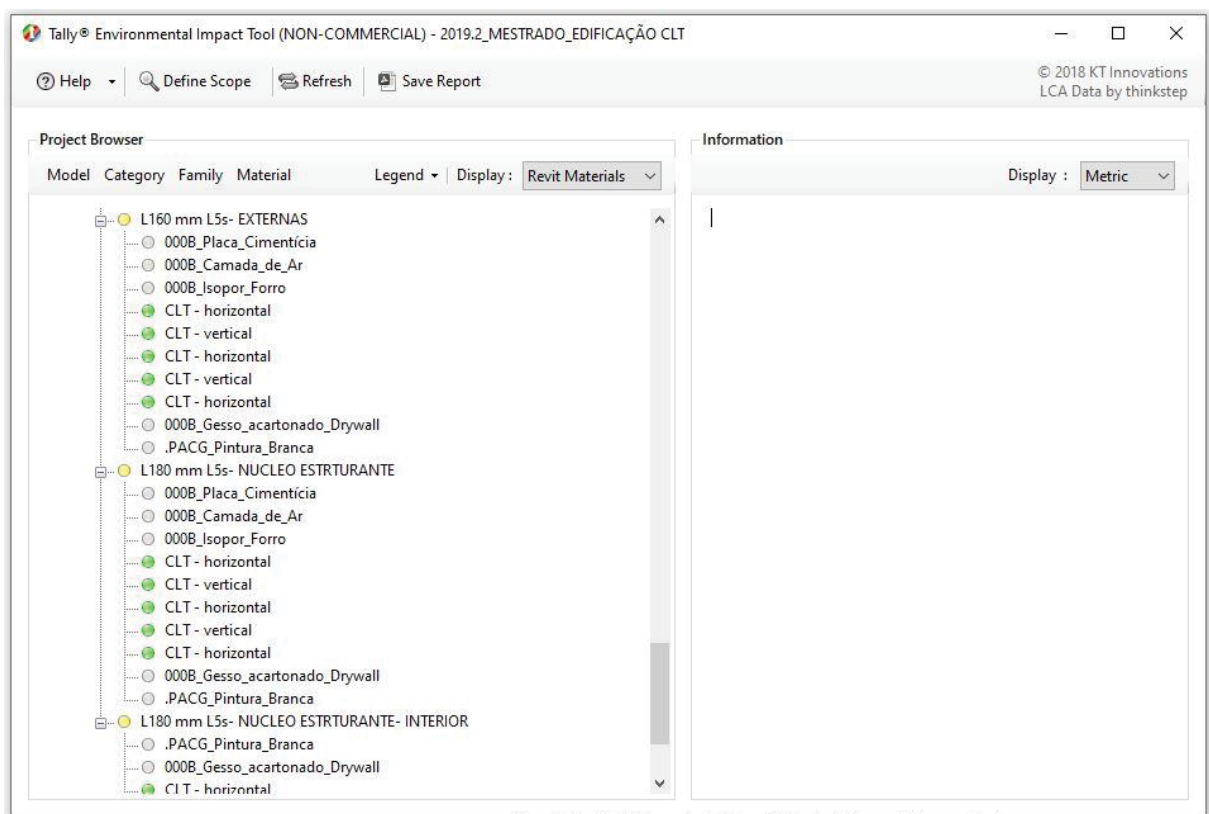
Assim, não foi necessário que estes materiais fossem subtraídos do modelo, mas apenas não incluídos durante o inventário da ACV em *Tally* (2019). Alguns deles puderam ser tirados antes da seleção, tais como as portas e janelas, no entanto, os materiais de acabamento entraram no inventário, mas não foram escolhidos dentre os materiais disponibilizados pelo banco de dados do plugin.

Na Figura 27 é possível visualizar a escolha de materiais para estrutura e vedação, sendo estes representados como bolinhas verdes em *Tally* (2019) e aqueles que são elementos

comuns a todos os modelos e que não foram definidos para esta ACV estão com as bolinhas sem preenchimento de cor. A raiz de cada item é também preenchida em verde ou amarelo, sendo o verde representado quando todos os itens foram preenchidos e o amarelo quando alguns itens estão sem preenchimento.

É importante destacar que o plugin *Tally* (2019) utiliza para a modelagem de ACV um banco de dados e os princípios de modelagem do *Gabi* (2019) e que os bancos de dados são utilizados em todo o mundo, tanto para fins industriais como científicos, sendo que, deste modo, as incertezas devido ao uso de dados de proxy são reduzidas por serem cruzados dados tecnológicos e geográficos (TALLY, 2019).

FIGURA 27 - RAIZ PARA A ESCOLHA DOS MATERIAIS EM TALLY



FONTE: A autora, via Tally (2019).

A escolha de cada material acontece de maneira individual e é necessário buscar a opção que se enquadra nos materiais informados em BIM. A escolha do material se dá por meio da escolha do nome e por uma breve descrição que aparece ao lado da seleção, sendo possível distinguir materiais e avaliar aquele de maior similaridade com o material escolhido no modelo, conforme mostra a Figura 28.

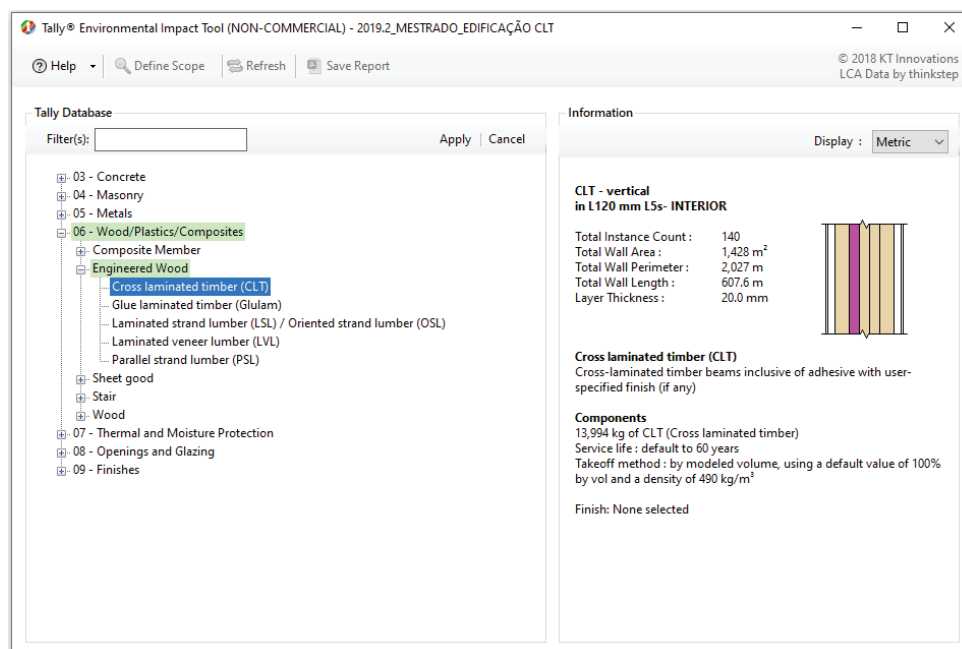
É novamente importante destacar que a base de dados *Gabi* (2019) tem dados relativos ao inventário de materiais europeus, americanos e alguns com base mundial, não havendo um inventário nacional brasileiro a ser selecionado, desta forma, é preciso entender que estes valores podem ser relativos a realidades diferentes daquela encontrada no Brasil e que, portanto, carecem de uma análise mais aprofundada.

Assim como os dados de *Gabi*, também a simulação em *Tally*, tem base em cálculos americanos e de acordo com TRACI 2.1, que é o formato padrão para gerar relatórios de impacto ambiental por meio de ACVs para a América do Norte (TALLY, 2019).

Após a escolha do material dentro da base de dados, é ainda necessário escolher uma série de outros itens complementares e de acordo com as necessidades de cada material, tais como sua durabilidade, materiais complementares ao seu uso, tais como argamassas em paredes de blocos, reforços, como é o caso das ferragens utilizadas em estruturas de concreto armado, além de acabamentos das peças, conforme pode ser visto na Figura 29.

No entanto, estes elementos complementares não obrigatórios podem ser retirados dos cálculos, já aqueles obrigatórios, como é o caso de argamassa de assentamento, no caso de blocos, devem ser preenchidos para que se possa dar continuidade à ACV.

FIGURA 28 - SELEÇÃO DE MATERIAL E CARACTERÍSTICAS DESTES NO BANCO DE DADOS



FONTE: A autora, via Tally (2019).

Como exemplo, o concreto moldado *in loco* utilizado nas peças estruturais dos modelos foi definido conforme sua classe de resistência e de acordo com a necessidade da

colocação de armação metálica em seu interior. Nesse sentido, foi definida a utilização de armação e ferragens no interior das peças interior, qual a sua finalidade e com isso se a demanda por ferragens é alta ou baixa. Desta forma, não foi necessário que as armaduras estivessem inseridas no modelo durante a sua modelagem em BIM, mas estas foram quantificadas por *Tally*.

Outro exemplo são as paredes elaboradas em bloco cerâmico ou bloco de concreto, visto que durante a seleção do material e complementares é possível definir o tipo de argamassa utilizada para o assentamento das peças, bem como argamassa de cobrimento, dentre outros fatores. Para este estudo, apenas a argamassa de assentamento foi definida, não sendo adicionada argamassa de cobrimento, reboco etc., visto que os acabamentos não estão incluídos na análise de nenhum dos três modelos.

FIGURA 29 - DEFINIÇÕES DE TEMPO DE VIDA ÚTIL DO MATERIAL E ELEMENTOS COMPLEMENTARES

FONTE: A autora, via Tally (2019).

Após definidos os materiais de acordo com o banco de dados disponível, ajustados os dados e elementos complementares destes, é possível fazer a simulação em *Tally* (2019), sendo, finalmente, possível complementar as informações com as fases não englobadas durante o processo de definição do inventário dos materiais, como pode ser visto na Figura 30.

Dentre os fatores a serem preenchidos estão o tempo de vida útil da edificação, neste caso 50 anos, bem como os dados relativos ao tipo e distancias percorridas pelo transporte desde a fábrica até o canteiro de obras, preenchidas conforme a Tabela 13.

Também os dados relativos ao impacto gerado durante a fase de construção ou montagem podem ser incluídos por meio do preenchimento de um quadro específico, conforme mostra a Figura 30, no entanto, este dado não será colocado devido a dificuldade em estimar valores relativos à montagem de edificações verticais em CLT no Brasil, sendo necessário um estudo mais aprofundado acerca deste tema.

FIGURA 30 - ABA DE SELEÇÃO PARA ITENS COMPLEMENTARES DA ACV EM TALLY

The screenshot displays the 'Report Details' window of the Tally Environmental Impact Tool. The interface is organized into several sections:

- Report Information:** Fields for Title (Full building summary), Date (17/12/2019), Author (prof\_brunamaidel), Company (UFPR), Project (MODELO EM BLOCO DE CONCRETO), Location (CENTRO POLITÉCNICO), and Cover (- set image -). It also includes Gross Building Area (2610,10 m²) and Expected Building Life (50 years).
- Goal and Scope of Assessment:** A text box containing 'ACV da edificação em BLOCO DE CONCRETO.'
- Transportation Impacts:** A button to 'Edit transportation distances'.
- Biogenic Carbon:** Radio buttons to 'Include biogenic carbon (default)' (selected) or 'Exclude biogenic carbon'.
- Include Construction Impacts:** A checkbox (unchecked) with a sub-section for 'On-site Construction' (Electricity, Heating, Water) and a 'Source' dropdown menu with a 'Map' button.
- Include Operational Energy Impacts:** A checked checkbox with a sub-section for 'Annual Site Energy Use' (Electricity: 250 kWh/m², Heating: 0 kWh/m²) and a 'Source' dropdown menu with a 'Map' button.
- Output Summaries:** Checkboxes for 'Bill of Materials (Excel)', 'Contribution Assessments (PDF)', 'Life Cycle Stage', 'Division', and 'Revit Category'.

The window title bar indicates the software version and project name: 'Tally® Environmental Impact Tool (NON-COMMERCIAL) - 2019.2\_MESTRADO\_EDIFICAÇÃO B.C.'. The bottom right corner shows the copyright notice: '© 2018 KT Innovations LCA Data by thinkstep'.

FONTE: A autora, via Tally (2019).

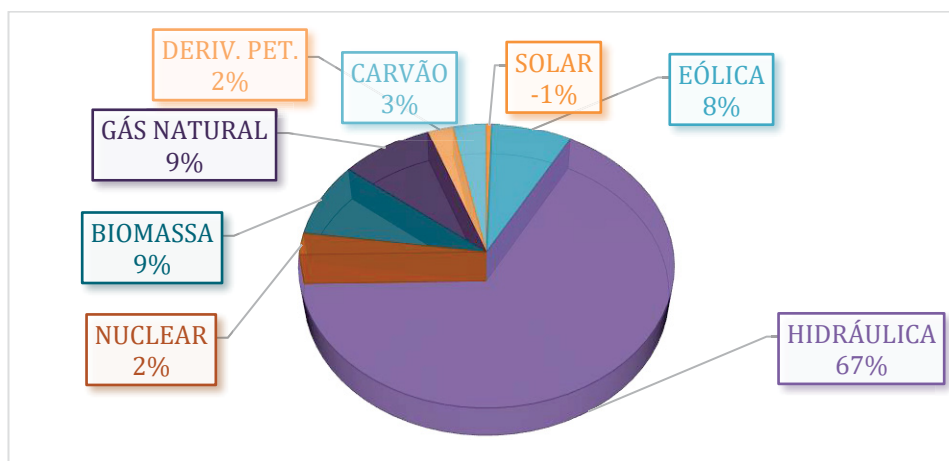
Também os dados relativos ao consumo de energia durante a fase operacional (B6) da edificação são inseridos nesta aba de diálogo, sendo que estes deveriam ser preenchidos com os valores obtidos pela simulação em nuvem por meio do *Insight 360* (2019) e gerados detalhadamente em seu plugin complementar *Green Building Studio* (2019) com o consumo de energético da edificação.

É necessário preencher qual é a base da matriz energética utilizada como base para a composição das fontes de energia utilizadas para o cálculo, todavia, não há a opção da matriz energética brasileira, sendo disponibilizadas apenas bases europeias, americanas, da Oceania e de alguns países asiáticos. Com isso, buscou-se um país que apresentasse uma matriz energética para a energia elétrica de maior similaridade com relação a matriz energética brasileira.

Dentre as opções disponíveis, aquela com maior similaridade foi a matriz energética para geração de energia elétrica da Croácia, visto que a energia hidráulica ocupa posição de destaque também neste país sendo responsável por cerca de 47% da composição (IEA, 2019).

No entanto, as diferenças das matrizes energéticas brasileira e croata são bastante grandes, resultando em distorções consideráveis nos resultados relativos aos impactos ambientais gerados pela edificação durante sua fase operacional. Desta forma, optou-se por não incluir os valores de consumo energético da edificação obtidos por meio do uso do *Autodesk Insight 360*.

GRÁFICO 6 – MATRIZ ELÉTRICA BRASILEIRA



FONTE: Adaptado de EPE (2019).

Vale lembrar que o impacto operacional da edificação está entre aqueles de maior participação ao longo do ciclo de vida da edificação e que, portanto, poderia resultar em grande distorção de resultados equiparar a matriz energética brasileira a uma matriz energética que tem 20% menos produção de energia a partir de fonte hidráulica como a Croata, que é a opção de maior similaridade dentre as opções apresentadas em *Tally* (2019).

Ainda é possível definir se serão incluídos ou não dados relativos à inclusão do carbono biogênico dentro desta aba de opções em *Tally*. Este carbono biogênico é aquele transferido da natureza para a esfera tecnológica por meio do uso de produtos naturais, sendo

considerado que este é adquirido durante o crescimento na natureza e emitido posteriormente por meio da combustão ou da biodegeneração dos produtos com carbono biogênico, fazendo o processo conhecido como sequestro de carbono. Optou-se por incluir este item nos cálculos para os três modelos (ISO 21930: 2017).

Após o preenchimento dos campos disponíveis por meio do levantamento prévio, é gerado o relatório final para a Avaliação do Ciclo de Vida do modelo. Sendo gerado um relatório final e uma planilha em Excel para o acesso apenas aos resultados obtidos, não sendo disponibilizados os dados e cálculos que deram origem aos resultados.

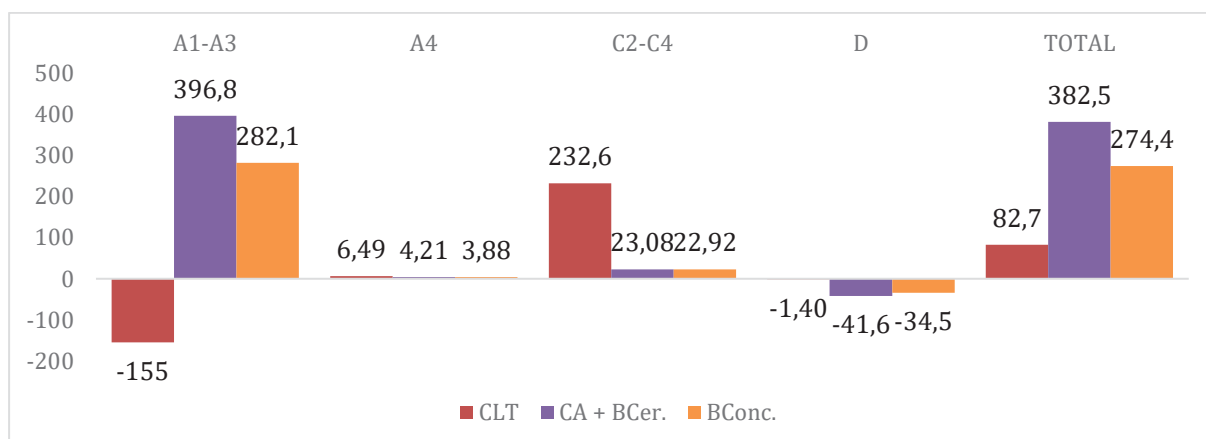
## 6.1 RESULTADOS DA ACV EM TALLY

A partir do relatório final e da planilha disponibilizada por *Tally* é possível analisar e interpretar os resultados obtidos com relação a diversas categorias de impacto, são elas: Potencial de Aquecimento Global (GWP), medido em kg CO<sub>2</sub> eq.; Acidificação, medido em kg SO<sub>2</sub> eq.; Eutrofização, em kg N eq.; Formação de fumaça, em kg O<sub>3</sub> eq.; Depleção de Ozônio, em kg CFC- 11 eq.; Energia primária, energia não renovável e renovável, medidas em MJ.

Para este estudo devem ser consideradas e ter seus resultados discutidos apenas as categorias de impacto relativas à emissão de dióxido de carbono equivalente, por meio da análise do Potencial de Aquecimento Global (kg CO<sub>2</sub> eq.) e o consumo de energia, por meio da avaliação do consumo de energia primaria, não renovável e renovável (MJ). Desta forma, o Gráfico 7 apresenta os valores totais de Potencial de Aquecimento Global da edificação por m<sup>2</sup> construído ao longo das fases incluídas na ACV de *Tally* (2019).



GRÁFICO 7 – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup>) POR ETAPA DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

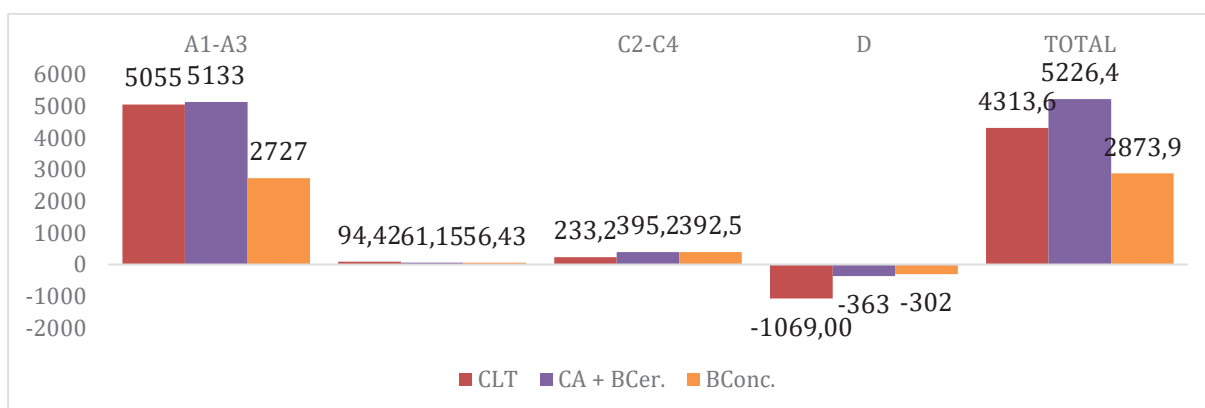
É interessante observar que os totais do Potencial de Aquecimento Global obtidos no Gráfico 7 mostram a grande diferença de resultados obtidos dentre os modelos analisados durante as fases pré-operacionais e pós-operacionais, em virtude, principalmente, da capacidade do CLT em armazenar carbono durante o processo de crescimento das árvores.

Portanto, o resultado para o impacto total do modelo da edificação de oito pavimentos é de 82,7 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup> para a edificação em CLT, sendo que este valor é 3,3 vezes maior para o modelo que utiliza também um sistema autoportante em bloco de concreto (274,4 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup>) e cerca de 4,6 vezes maior para o modelo que tem estrutura e vedação separadas, em concreto armado e bloco cerâmico (382,5 kg CO<sub>2</sub> eq./m<sup>2</sup>).

Este resultado demonstra a grande capacidade da madeira, principal matéria prima para a fabricação do CLT em fazer o sequestro de carbono e, finalmente, de libera energia apenas ao final de seu ciclo de vida, durante o processo de queima da madeira.

Já com relação a comparação entre o consumo de energia primária dos modelos, a partir do Gráfico 8 é possível inferir que os resultados obtidos trazem uma proporção diferente entre a quantidade total de energia primária gasta nas diferentes técnicas construtivas, devido ao uso de determinados materiais que tem um consumo energético mais elevado durante seu processamento e fabricação, explicado em maiores detalhes no item que coloca o consumo energético de cada material que compõe a ACV da edificação.

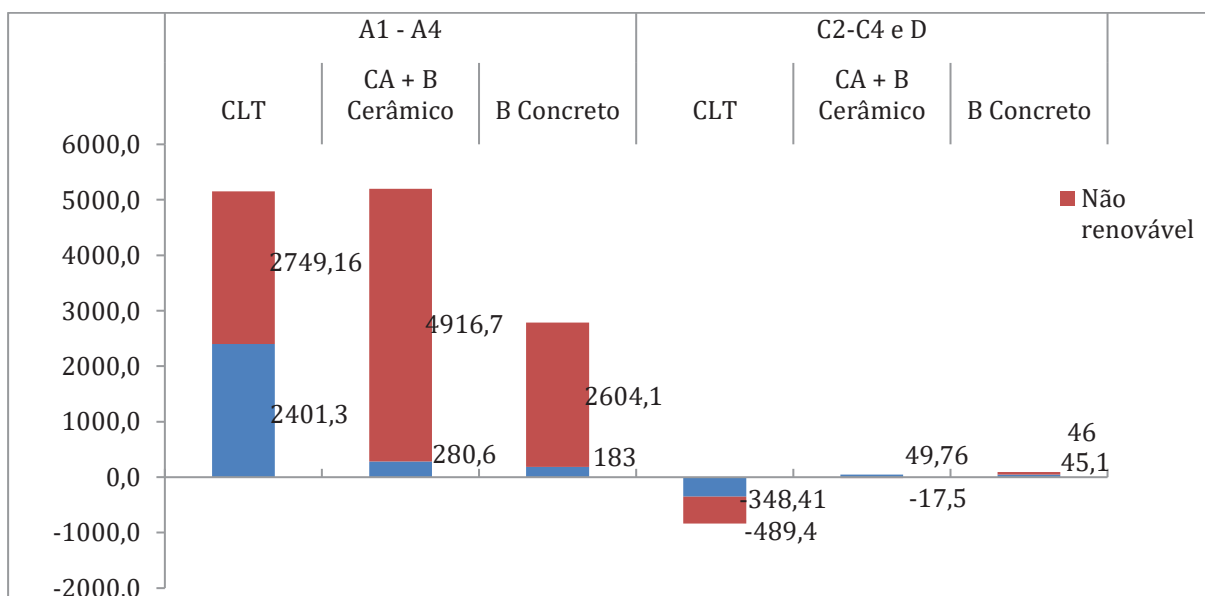
GRÁFICO 8 – ENERGIA PRIMÁRIA (MJ/m²) POR ETAPA DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

É possível visualizar que é, sobretudo, durante a fabricação dos materiais que existe uma maior diferença de consumo de energia dos materiais, o que resulta em um consumo de energia primária pelo modelo em bloco de concreto que equivale a pouco mais de 65% do modelo em CLT. Já para o modelo em concreto armado, o consumo é pouco mais que 20% maior do que o mesmo em CLT. Sendo o CLT a opção intermediária com relação ao consumo de energia global da edificação, quando desconsiderada a energia operacional dela.

GRÁFICO 9 - ENERGIA RENOVÁVEL E NÃO RENOVÁVEL POR METRO QUADRADO (MJ/ m²) EM CADA ETAPA DO CICLO DE VIDA DA EDIFICAÇÃO



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

Todavia, conforme pode ser visto pelo Gráfico 9, é importante avaliar que o cálculo de consumo de energia primária é feito pelo somatório de energia renovável (azul) e não

renovável (vermelho), e que, para o somatório das mesmas se obtém resultados melhores para o modelo em bloco de concreto, por conta dos dados de entrada utilizados para o bloco de concreto, conforme é possível observar no Gráfico 12, que demonstra a proporção de consumo de energia por material para o modelo em bloco de concreto.

#### 6.1.1 Pré-operacional (A1-A4)

A partir do Gráfico 9, é possível inferir que o consumo de energias não renováveis pelo CLT é o menor, se comparado ao modelo em bloco cerâmico e concreto armado, visto que grande parte da energia para a produção do mesmo vem de fontes renováveis, sendo assim, também o modelo que tem maior proporção de consumo energético de fontes renováveis. No entanto, quando observado o consumo total de energia, é perceptível que o modelo em CLT e o modelo em alvenaria convencional tem grande proximidade durante a fase de produção e transporte de materiais até a obra.

Já em relação ao modelo em blocos de concreto, é visível que seu consumo energético de fontes não renováveis é muito próximo ao modelo em CLT, já para fontes renováveis este valor é bastante baixo. Neste sentido, acredita-se que esta diferença é ocasionada pelo baixo desperdício de material e também pela redução das dimensões estruturais em edificações em bloco de concreto, visto ser uma edificação autoportante, e, portanto, ter uma estrutura complementar, os grautes verticais e horizontais, muito menor do que o modelo que utiliza o concreto armado como estrutura e blocos cerâmicos apenas como vedação.

Todavia, a reduzida diferença entre o CLT e o modelo em concreto e bloco cerâmico, mostra que, ainda que as principais fontes de gasto energético para produção dos painéis em CLT sejam provenientes de fontes renováveis, o montante total de energia consumida é significativo, já que é necessário uma grande quantidade de madeira e, consequentemente, de cola, para a produção do mesmo.

Vale lembrar novamente que os valores de construção e montagem (A5) não estão computados nos totais de energia consumida, no entanto, estima-se que se estivessem, os valores poderiam ter maior diferença, visto que, é sabida a redução de geração de desperdício em obras pré-fabricadas, como é o caso do CLT, seguido da construção modulada em bloco de concreto e, finalmente, para aquele de maior geração de resíduos, a obra construída no local em alvenaria de blocos cerâmicos e com a estrutura em concreto armado executada *in loco*.

### 6.1.2 Operacional (B2-B6)

Durante a fase operacional, que compreende todos os gastos e emissões geradas pelo uso, manutenção e substituição dos materiais, não foram computados valores para a ACV, isso ocorre, em primeiro momento por conta de não terem sido incluídos os valores relativos ao consumo energético da edificação (B6), já que as matrizes energéticas disponíveis em *Tally*, são bastante diferentes daquelas registradas na matriz energética brasileira, mostrando, desta forma, uma realidade incompatível com aquela esperada para este estudo.

Contudo, também nesta fase são calculados os gastos com manutenção, reforma, remodelação e substituição dos materiais da edificação. No entanto, por terem sido computados nesta ACV apenas os materiais da estrutura e da vedação, e por dois dos modelos serem autoportante, ou seja, a estrutura e a vedação estarem fundidas, e por considerar que a vedação do outro modelo, em blocos cerâmicos tem capacidade em resistir ao período de 50 anos de uso, os gastos de substituição de material foram zerados pela simulação em *Tally*. Todavia, seria interessante que em *Tally* houvesse ao menos uma pequena previsão para os gastos de manutenção e possíveis reparos para o material, e não a consideração unicamente da substituição total do material.

Para o gasto operacional, conforme mencionado acima, apesar de não computado durante a simulação da Avaliação de Ciclo de Vida, foi simulada em um software específico, o *Insight 360* em conjunto com *Green Building Studio*, demonstrando as diferenças de consumo operacional de cada um dos modelos.

Neste sentido, é possível visualizar que a edificação que tem menor consumo elétrico é o modelo em CLT, acredita-se que em virtude de os verões amenos de Curitiba - PR e, assim, a reduzida necessidade de condicionamento de ar neste período, e por consequência, reduzir o consumo energético, visto que, neste caso, os consumos relativos a iluminação e uso de eletrônicos é idêntico em todos os três modelos. Já o modelo em bloco de concretos foi aquele que obteve os piores resultados para o consumo elétrico.

Já para o consumo de combustíveis ou gás, a edificação em CLT obteve um resultado pior em comparação as demais por conta da redução da espessura dos painéis nos pavimentos mais altos, sendo que os dois outros modelos obtiveram resultados bastante similares.

### 6.1.3 Pós-operacional (C2-C4 e D)

Já para a fase pós-operacional fica claro pela leitura do Gráfico 9 que o CLT é aquele que tem melhor desempenho em relação as demais opções, uma vez que ele gera energia durante estas fases (C e D), enquanto que para os outros dois modelos, a somatória das fases de final de ciclo de vida e destino final da edificação somam valores positivos.

Isso ocorre em virtude da destinação final que é dada para estes materiais. Em *Tally* a destinação final dos materiais é feita conforme o inventário pré-estabelecido, sem que haja possibilidade de este ser modificado. Assim, 14,5% do CLT é recuperado ao final do ciclo, 22% vai para queima e geração de energia e 63,5% é destinada para aterro.

Acredita-se que o valor que é recuperado ou queimado com geração de energia possa ser ainda maior, reduzindo, assim, a porcentagem do material que vai para aterro e, conseqüentemente, crescendo o total de energia produzida durante o final do ciclo de vida da edificação.

Uma vez que, em *Tally*, a destinação final do material é determinada por um relatório municipal de resíduos sólidos da construção civil e recuperação de resíduos de madeira dos Estados Unidos elaborado por Dovetail Partners Inc. (BRATKOVICH et al., 2014) e este pode não representar a opção mais adequada a destinação da madeira proveniente dos painéis de CLT, uma vez que generalizam os rejeitos de madeira da construção civil.

Também a presença de colas entre os painéis de madeira é um fator determinante para a discussão a cerca da destinação final do material ao final do ciclo de vida. Acredita-se que, por se tratar de um material industrializável relativamente novo, as colas e também tratamentos químicos da madeira para a fabricação do CLT tenham muito a evoluir e que a utilização de colas de menor impacto ambiental deva ser uma das maiores preocupações durante o processo de evolução da técnica construtiva.

Para o Potencial de Aquecimento Global, durante as duas últimas fases da edificação, conforme pode ser visto pelo Gráfico 7, a emissão equivalente de dióxido de carbono pela edificação em CLT é a mais alta dos três modelos, novamente em virtude do impacto gerado na natureza pelas colas utilizadas e pela dificuldade em processar este material durante o final do ciclo de vida.

Para os materiais derivados do concreto, como o concreto moldado *in loco*, concreto pré-fabricado, blocos de concreto e argamassas, o destino final do produto é basicamente o mesmo, sendo 55% reciclado e utilizado como agregado grosso e 45% levado para aterro como material inerte.

Também o bloco cerâmico tem a mesma destinação final de produto. Enquanto o aço utilizado dentro do concreto armado tem uma taxa de 70% de recuperação e reutilização do

material e o restante é levado para aterro também como material inerte, visto que parte deste material, por estar dentro do concreto e, muitas vezes, por apresentar diâmetro reduzido, torna difícil e inviável sua retirada e recuperação.

## 6.2 RESULTADOS TOTAIS DA ACV EM TALLY POR MEIO DA ANÁLISE DE CADA MATERIAL

Apesar de levantar os dados relativos a todas as etapas de produção da edificação de um modo global, é também importante totalizar os resultados obtidos da composição de cada modelo por meio da análise da participação de cada material em sua composição.

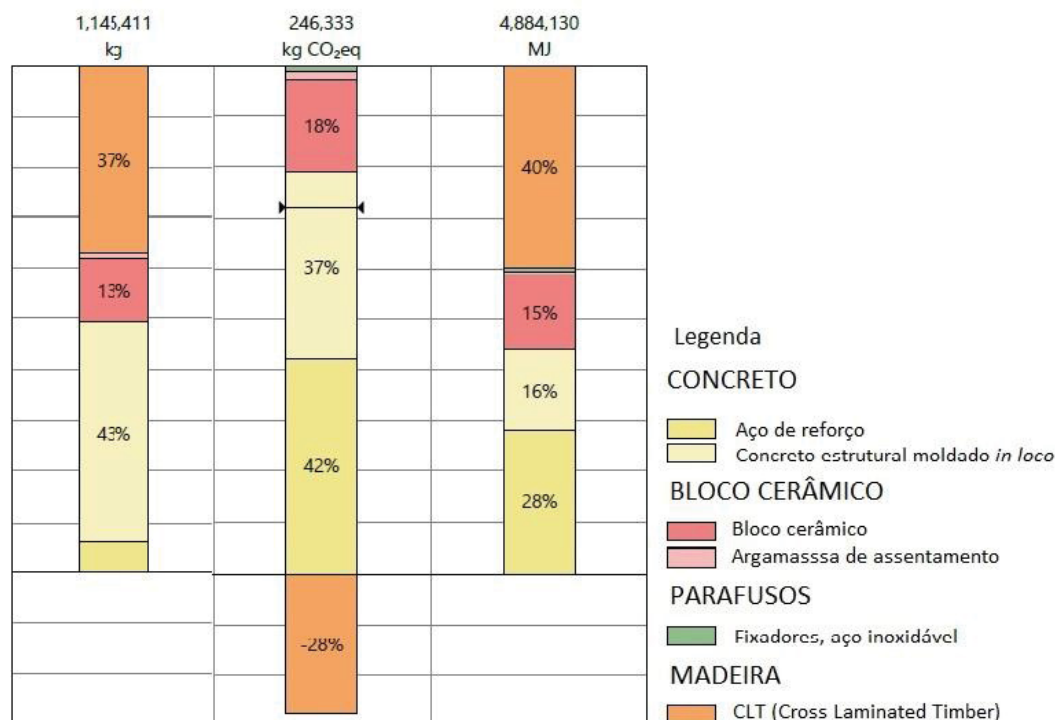
Para tanto, cada modelo deve ser avaliado em proporção de composição de massa de cada material incluído para a ACV e em relação a sua proporção na composição dos impactos ambientais gerados para as categorias de Potencial de Aquecimento Global e de consumo de energias não renováveis.

### 6.2.1 Modelo em CLT

Começando pelo modelo em CLT, a partir dos resultados apresentados no Gráfico 10, infere-se que a proporção de massa representado pelo CLT em sua composição final é de 37%, menor do que a proporção representada pelo concreto utilizado como estrutura no pavimento térreo e em sua fundação, que representa 43% da massa.

Todavia, para a composição de impactos gerados para cada material, fica visível que com relação as emissões equivalentes de carbono, o CLT tem valor negativo, em um total de -28%, em virtude do potencial de sequestro de carbono das árvores utilizadas para a fabricação do mesmo, sendo o único material em todas as análises que apresenta esse comportamento.

GRÁFICO 10 – POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO<sub>2</sub> eq.) E ENERGIA NÃO RENOVÁVEL (MJ) POR MATERIAL DO MODELO EM CLT



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

Ressalte-se que o sequestro de carbono da madeira na composição para o GWP se sobrepõe inclusive ao grande impacto gerado pelo uso de colas e adesivos sintéticos para a junção das tabuas em madeira, o que fica visível se analisados os valores relativos ao percentual de participação do CLT na composição de outros impactos ambientais, tais como o Potencial de Acidificação (78%), Potencial de Eutrofização (92%), Potencial de Formação de Fumaça (65%), visto que estas categorias de impacto ambiental medem outros fatores de impacto gerado pelos materiais ao meio ambiente e que, portanto, trazem perspectivas da emissão de gases para a produção destas colas e adesivos.

Se voltarmos a analisar a emissão equivalente do dióxido de carbono, é interessante observar que o aço utilizado dentro do concreto representa 42% das emissões, apesar de representar um peso menor que 10% para a composição total, enquanto que o concreto é também responsável por uma grande fatia na geração de gases em GWP, 37%, mas estes são em menor proporção do que a sua fatia na composição total de massas.

Ainda com relação ao modelo em CLT, para o consumo de energia de fontes não renováveis, o CLT é o material com maior consumo de produção, visto sua grande participação em volume para o modelo. Neste sentido, 40% dos gastos energéticos são provenientes do CLT,

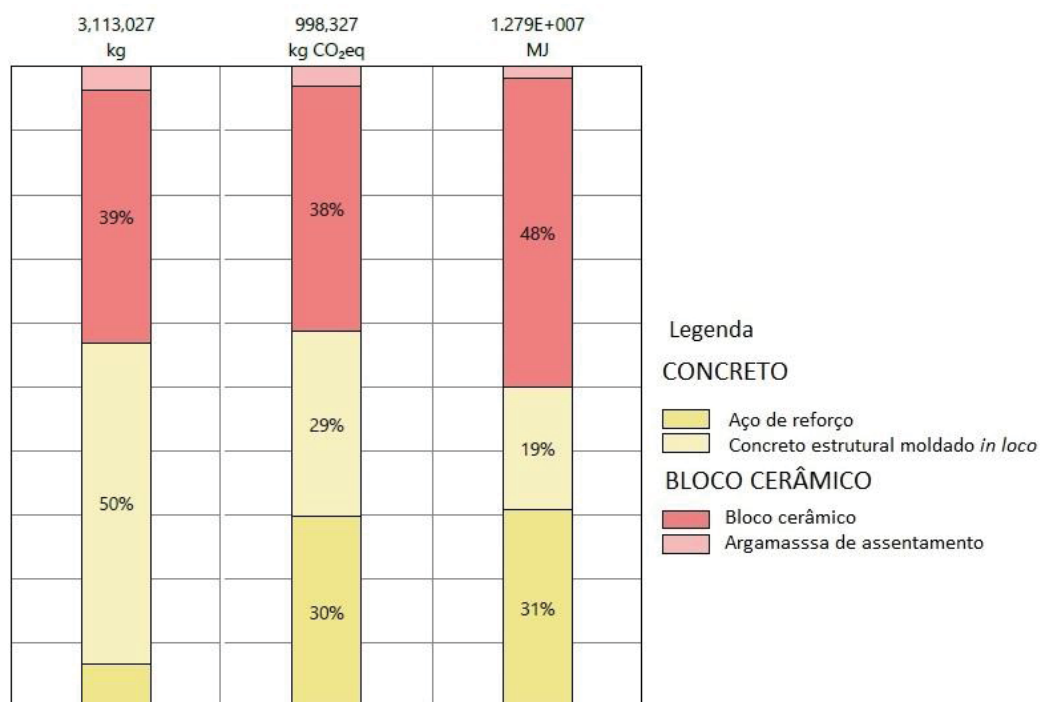


28% do aço, 16% do concreto e os blocos cerâmicos, apesar dos dois últimos serem utilizados apenas no térreo, representando 15% deste total.

### 6.2.1 Modelo em concreto armado e bloco cerâmico

Para o segundo modelo, como estrutura em concreto armado e vedação em blocos cerâmicos, os resultados em relação a proporção de massa do material com a seu impacto ambiental são os mesmos observados no modelo anterior para os materiais que tem em comum, concreto, bloco cerâmico e aço, sendo a participação do aço maior e concreto com participação menor do que o seu percentual de composição na massa.

GRÁFICO 11 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO<sub>2</sub> eq.) E ENERGIA NÃO RENOVÁVEL (MJ) POR MATERIAL DO MODELO EM CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

Pelo Gráfico 11 fica visível o impacto causado pelo uso de blocos cerâmicos em toda a vedação. Pelo modelo em CLT já era visível que a participação do bloco cerâmico na composição do consumo de energias não renováveis é maior do que seu peso em percentual para a composição de massa, no entanto, neste modelo fica bastante claro que o bloco cerâmico é o maior responsável pelo consumo de energia da edificação, sendo o responsável por quase metade de todos os gastos em energia do modelo, e representar 39% da massa do modelo.

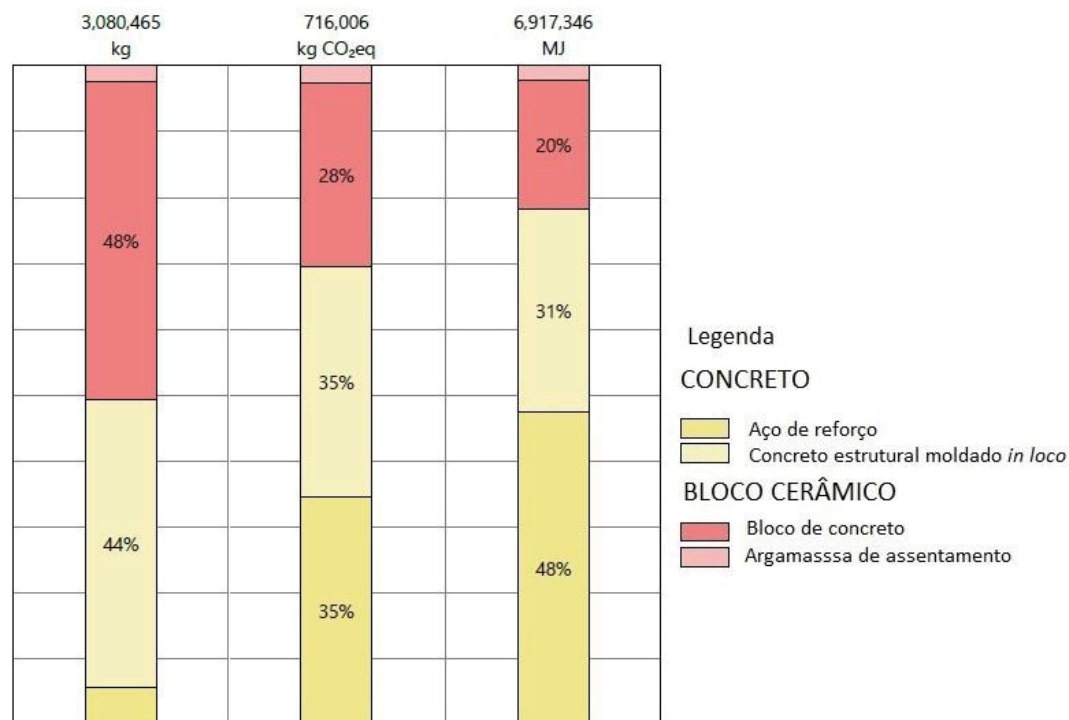
### 6.2.3. Modelo em bloco de concreto

Com relação ao modelo em bloco de concreto estrutural complementado por grautes verticais e horizontais em concreto armado, mais uma vez a proporção de impacto da estrutura em aço fica evidente. Desta vez, apesar deste ser responsável pouco mais de 5% da massa da edificação, sua participação na composição de emissão equivalente de CO<sub>2</sub> é de 35%, e para o consumo de energias não renováveis é de quase metade do total de Mega Joules consumidos, isto acontece devido ao gasto energético e emissão de carbono para outros materiais ser relativamente mais baixo do que a sua proporção em percentual de massa.

A proporção para a participação do concreto é de 50% da massa, 35% de CO<sub>2</sub> equivalente e 31% de energias não renováveis, sendo este utilizado para o graute vertical e horizontal, lajes, fundação, vergas e contravergas grauteadas também.

Enquanto isso, os blocos em concreto, apesar de serem responsáveis por cerca de 39% da massa da edificação, são responsáveis por 28% das emissões de CO<sub>2</sub> e por apenas 20% do consumo de energias não renováveis, o que representa uma parcela bastante pequena das emissões quando comparado ao consumo energético dos blocos cerâmicos. Além disso, aqueles desempenhem a função de vedação e estrutura, podendo representar uma grande economia em relação ao consumo de energia se comparado ao modelo com blocos cerâmicos, no entanto, é necessário que sejam analisados os resultados como um todo, totalizando todas as emissões e gastos energéticos combinados dos materiais, sendo possível obter resultados não favoráveis ao edifício em bloco de concreto.

GRÁFICO 12 - POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL (kg CO<sub>2</sub> eq.) E ENERGIA NÃO RENOVÁVEL (MJ) POR MATERIAL DO MODELO EM BLOCO DE CONCRETO



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

#### 6.2.4 Comparação entre os modelos

No sentido de comparar os totais emitidos nas edificações a partir da análise de consumo energético levando em consideração os valores globais da ACV divididos por material, é possível ranquear aqueles que apresentam um melhor desempenho ambiental.

Para tanto, conforme pode ser observado no Gráfico 13, que compara os impactos causados por cada modelo, visivelmente o CLT é o modelo de menor massa, com apenas 1.145 toneladas, pouco mais de um terço da massa total dos demais modelos, considerando ainda a fundação em concreto, estimada também com um terço da dimensão dos demais modelos.

Para os outros dois modelos, houve uma pequena redução no peso do modelo em bloco de concreto para o modelo em concreto armado, principalmente em virtude de este ter uma maior representatividade em massa para o concreto armado, todavia, esta diferença é mínima, de 3.113 toneladas e 3.080 toneladas para o modelo em bloc cerâmico e em bloco de concreto, respectivamente.

Com relação ao Potencial de Aquecimento Global, medido em kg CO<sub>2</sub> equivalente, assim como o resultado obtido na análise das emissões por m<sup>2</sup> construído, também os resultados totais apresentam uma grande diferença entre os modelos, sendo que o modelo em CLT tem

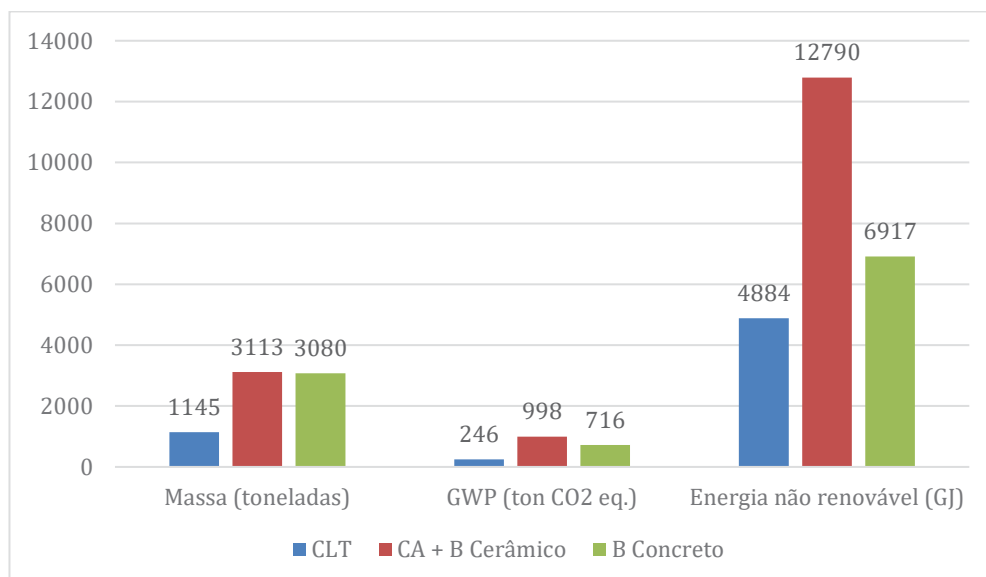
um consumo inferior aos demais, passando pelo modelo em blocos de concreto e, finalmente, com pior resultado está o modelo que utiliza blocos cerâmicos, que tem uma grande fatia de suas emissões por conta do processo de fabricação e cura dos blocos cerâmicos.

Situação bastante similar é encontrada nos resultados para o uso de energias não renováveis, medindo em MJ, quando o bloco cerâmico tem também grande participação no consumo energético fazendo com que o modelo em blocos cerâmicos tem um resultado cerca de duas vezes (2x) e duas vezes e meia (2,5x) maior em relação ao modelo em bloco de concreto e em CLT, respectivamente. Ficando o modelo em CLT também como o modelo de menor consumo de energias não renováveis.

Sobretudo, quando os acabamentos são discutidos, é importante destacar que apesar de terem sido balizadas que todas as edificações teriam os mesmos tipos de acabamentos, é necessário lembrar que as indicações dos materiais utilizados estão diretamente relacionadas às necessidades da madeira, e portanto, do modelo em CLT, de proteção contra intempéries e umidades.

Desta forma, para os demais modelos, não seria necessário, bem como não é uma prática comum da indústria da construção brasileira que os acabamentos tivessem tantas camadas, fossem feitos com gesso acartonado, proteção impermeável ou fachada ventilada.

GRÁFICO 13 -COMPARATIVO ENTRE OS IMPACTOS DE CADA MODELO



FONTE: A autora, a partir dos resultados de Tally (2019).

Apesar de não terem sido contabilizados na ACV os impactos dos acabamentos, se fossem elaborados modelos de acordo com os acabamentos tradicionais utilizados em

edificações no Brasil, com argamassa de regularização interna e externa, provavelmente os resultados seriam diferentes. Haveria, assim, uma maior diferença entre a energia e as emissões dos modelos, visto que para o CLT não é indicado o uso de argamassa, mas o de placas de gesso internas e parede ventilada externa, enquanto os modelos em concreto armado e bloco cerâmico e em bloco de concreto permitem a simplificação dos acabamentos em argamassa.

No entanto, se esta mesma alteração for feita para a avaliação do consumo energético durante sua operação (B6), é bastante provável que com os acabamentos reduzidos ao uso de argamassa e pintura, e a falta de camada de ar, os modelos em bloco cerâmico e concreto teriam um consumo energético ainda maior do que aquele obtido pela simulação deste trabalho, quando utilizados acabamentos similares para todos os modelos.

## 7 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES FINAIS

O objetivo deste estudo era o de comparar o impacto ambiental de uma edificação vertical em CLT a outras edificações com as mesmas características físicas, mas com outras técnicas construtivas, sendo uma delas também denominada “alvenaria convencional”, com estrutura em concreto armado moldado *in loco* e alvenaria em blocos cerâmicos e a outra em blocos de concreto estrutural, grauteado com concreto moldado *in loco*, por meio da elaboração de uma Avaliação de Ciclo de Vida da edificação por meio de plugins integrados à BIM.

A partir do uso da ferramenta *Autodesk Revit* para a elaboração do modelo, os plugins também da *Autodesk*, *Insight 360* e *Green Building Studio* para a simulação termo energética do modelo para as diferentes técnicas construtivas e, finalmente, o uso do plugin *Tally* para a elaboração da ACV deste modelo e novamente para as três diferentes técnicas construtivas.

Vale ressaltar que ainda se tem poucos registros de estudos brasileiros com relação ao uso de madeira engenheirada, como é o caso do CLT, sendo este estudo pioneiro com relação ao impacto ambiental gerado por edificações em CLT comparado a outras técnicas construtivas.

No entanto, pelo uso da madeira engenheirada se tratar de um desenvolvimento recente da indústria da construção, é necessário que mais estudos se dediquem a analisar o comportamento deste material de acordo com diferentes aspectos, tais como o florestal, industrial, de montagem, uso e ocupação de edificações, destinação final, dentre outros.

Estudos internacionais apontam para a capacidade de a construção civil absorver o excedente de grandes florestas plantadas de maneira sustentável, por meio da mitigação das emissões de dióxido de carbono estocados nas tabuas de madeira que compõe os painéis CLT.

Já a ACV quantifica os impactos ambientais gerados pela edificação por meio de categorias de impacto medidas durante todo o seu ciclo de vida, todavia, a falta de um banco de dados brasileiro ou de EPDs dos materiais nacionais poderiam trazer maior facilidade a pesquisas e resultados mais consistentes em relação à realidade nacional da construção civil, no entanto, é neste momento necessário buscar fontes internacionais para avaliar os impactos gerados pela edificação.

O uso de BIM auxilia arquitetos e engenheiros e demais profissionais da construção civil (AEC) a utilizarem critérios ambientais para o processo de decisão projetual, desta forma, o uso de ACV simplifica e a análise termo energética da edificação em BIM permite aos profissionais da área mais um critério de escolha durante o processo projetual.

Este capítulo apresenta os resultados, discussões e conclusões extraídas deste estudo, as vantagens e desvantagens do uso do CLT em edificações verticais, bem como as limitações

desta pesquisa durante a coleta de dados, elaboração do modelo e limitações encontradas nos softwares utilizados, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 7.1 RESULTADOS E CONCLUSÕES

A partir deste estudo é possível concluir que o uso do CLT é positivo se analisado a partir do aspecto ambiental em comparação com as demais técnicas construtivas avaliadas, em virtude, principalmente, do armazenamento de carbono das árvores e pela redução em massa da edificação. Visto isso, em relação a emissão de CO<sub>2</sub> para GWP, o modelo em CLT apresenta redução nas emissões totais por conta do sequestro de carbono, enquanto nenhum dos demais modelos apresenta materiais que tenham desempenho negativo com relação a emissão de carbono.

Contudo, a utilização de adesivos e colas para o processo de fabricação dos painéis ainda são um ponto de evolução para a indústria de painéis massivos de madeira, já que, complementarmente, o CLT é o material de maior impacto para categorias que medem a emissão equivalente de outros gases, como os de efeito estufa (O<sub>3</sub> eq.), acidificação (SO<sub>2</sub> eq.) e eutrofização da água (N eq.). Todavia, estes critérios de impacto não foram comparados entre os modelos, mas apenas retratados para aquele em CLT, em virtude da proporção do impacto do material em relação aos demais.

Com relação ao consumo energético durante as fases pré-operacionais e pós-operacionais, o modelo em CLT teve um melhor desempenho em relação aos demais para energias não renováveis. No entanto, para energias renováveis, o modelo em blocos de concreto apresenta um reduzido consumo, principalmente, por conta da produção dos blocos de concreto. Porém, em virtude da falta de rastreabilidade é difícil concluir qual é o fator determinante para este resultado apresentado pelo relatório em *Tally*.

Já para a fase operacional da edificação, o CLT obteve o melhor desempenho dentre os três modelos analisados em relação ao consumo de energia elétrica e o pior desempenho em relação ao consumo de combustíveis fósseis, apesar de estar dentro das mesmas proporções das demais alternativas.

No entanto, o uso de simuladores em BIM para a avaliação operacional da edificação, apesar de apontar a possibilidade de inovar em relação as simulações ambientais aplicadas à edificação, pode ser vista como um fator limitante desta pesquisa, visto que, os resultados obtidos não podem ser rastreados e interpretados a partir das variações anuais e trocas térmicas,



uma vez que são dados em termos absolutos para cada modelo e que, em muitos itens, parecem destoar dos resultados esperados para edificações habitacionais brasileiras.

O processo de fabricação dos painéis em CLT na Europa e na América do Norte trabalham com determinadas espécies de árvores que não carecem de processos de autoclavagem e proteção química da madeira, destoando também da realidade brasileira. No Brasil, existe a sinalização do uso de *Pinus* para a produção dos painéis, conforme já ocorre com a produção de madeira para a construção civil.

No entanto, o uso de colas e adesivos CCA e CCB podem representar um grande impacto ambiental no material, já que sua produção traria maiores impactos ao meio ambiente e a saúde humana e que sua destinação final poderia ser comprometida, por conta da redução de percentual destinado a reuso e queima como combustível.

Para os resultados obtidos por esta pesquisa é possível concluir que todos os modelos apresentariam um percentual de reciclagem da edificação que supera os 50% em massa de produtos que seriam reciclados e utilizados como agregado graúdo, como o concreto e os blocos cerâmicos, recuperados, como o aço ou queimados para a geração de energia, como o CLT.

Dentre os modelos, a edificação com maior percentual de massa reutilizada está aquela em concreto armado e bloco cerâmico, com 58,5%, seguido por aquela em blocos de concreto (57%) e CLT (53%). Contudo, é preciso levar em consideração que aquelas com maior potencial de reciclagem também são as que apresentam maior massa total e que o inventário do CLT prevê que mais de 60% do material será destinado a aterro sanitário, o que é questionável, devido ao potencial de inovação do produto, reduzido tempo de mercado, falta de casos concretos de final de ciclo de vida e, finalmente, desenvolvimento contínuo de produtos que possam mitigar os impactos que as colas e adesivos tem nestes produtos, permitindo no futuro que o material possa ser usado quase em sua totalidade para a geração de energia.

Neste trabalho, conclui-se que o uso do CLT pode mitigar os impactos ambientais causados pela construção civil brasileira, mas que ainda é necessário que mais estudos acerca do tema sejam elaborados e que outros aspectos a respeito do uso da madeira massiva para a construção de espaços de moradia e trabalho sejam elaborados. Também aspectos relativos à qualidade interna que ambientes em madeira trazem precisam ser observadas, como o conforto visual, a capacidade de redução da troca de umidade do ambiente, a filtragem do ar, dentre outros aspectos relacionados ao bem-estar do usuário em relação ao ambiente construído.

Faz parte ainda da necessidade de incrementar o uso da madeira na construção civil a necessidade de disseminação da tecnologia para a população por meio da promoção da técnica construtiva não só pelo meio científico, mas por meio do governo, setor agroflorestal e da

indústria da construção civil, por meio da divulgação dos benefícios do uso da madeira para a construção e da disponibilidade física de atendimento das demandas de produção pela indústria, a fim de promover o uso da madeira brasileira e incentivar a produção e manejo sustentável de florestas plantadas.

Com relação as principais dificuldades deste estudo estão a dificuldade em rastrear os resultados obtidos nas simulações em BIM, em ambos os plugins utilizados. Acredita-se que esta falha ainda acontece devido ao conhecimento e uso de ferramentas BIM para a sustentabilidade passa por um processo contínuo de desenvolvimento e melhoramento. É um grande avanço aos profissionais de AEC ter disponível ferramentas que permitam integrar critérios de análise de sustentabilidade ao projeto e a permitir que alterações rápidas do mesmo sejam feitas e recalculadas, permitindo que não mais avaliações neste sentido sejam feitas apenas por especialistas, mas que estes processos possam fazer parte da rotina de trabalho durante a fase de tomada de decisão de projeto.

A principal contribuição desta pesquisa é a de avaliar o uso do CLT pela construção civil a partir do aspecto ambiental e por meio do uso de ferramentas integradas ao projeto em BIM, permitindo interação, alteração e remodelagem da edificação ao mesmo tempo que os impactos ambientais gerados por ela podem ser avaliados simultaneamente.

Em suma, é possível concluir a partir desta pesquisa que edificações em CLT pode apresentar reduzida massa final, reduzida emissão de CO<sub>2</sub> eq. durante as fases pré e pós-operacional, reduzido consumo energético de fontes primárias durante as mesmas fases. No entanto pode ainda apresentar um consumo energético operacional equivalente ou maior que outras técnicas construtivas, a depender das características climáticas locais.

O uso de tecnologia BIM para sustentabilidade integrada ao processo de projeto atua como um facilitador de tomadas de decisão de projeto, fomentando melhoramentos e interações entre modelo e simulação integrada em BIM, contribuindo para técnicas construtivas que mitiguem os impactos ambientais sejam adotadas por profissionais da AEC.

## 7.2 PONTOS A SEREM CONSIDERADOS DURANTE A COLETA DE DADOS

A primeira dificuldade encontrada no desenvolvimento desta pesquisa foi a de encontrar projetos de edificações que utilizassem o CLT como técnica construtiva e que disponibilizassem de material técnico e projeto completo para análise. Esta primeira dificuldade resultou na proposta de elaborar uma edificação em CLT a partir de um modelo genérico brasileiro e a partir de um levantamento de edificações em CLT em outros países.

Também o uso de softwares e plugins em BIM para simulação do impacto ambiental das edificações é um tema relativamente novo, neste sentido, não havendo grande disponibilidade de informação, principalmente, a respeito de plugins que auxiliem nos cálculos do impacto ambiental das edificações associados ao modelo em BIM. Desta forma, a dificuldade encontrada com relação a critérios a serem utilizados para a escolha dos plugins se transfere também a dificuldade em compreender as funções e funcionamento dos plugins.

Outra dificuldade que está relacionada ao funcionamento do plugin foi conseguir enviar para a simulação termo energética em nuvem um modelo com oito pavimentos, que utiliza diferentes materiais e configurações de espaço internos, visto que este modelo é bastante complexo e diversos erros ocorreram durante seu processo de envio, o que resultou em lentidão de processamento e dificuldade em confiar nos resultados obtidos, visto a falta de rastreabilidade das informações processadas e alguns erros de envio de informação para a nuvem da *Autodesk*.

Ainda a coleta de dados com relação as informações da base de dados utilizada para a simulação de ACV se mostra como um ponto de fragilidade e dificuldade, visto que a informação existente durante a escolha dos materiais que compõe a edificação é bastante simplificada, resultando em escolhas que podem estar equivocadas com relação a melhor opção a ser escolhida para determinado material. Assim, foi necessário a coleta de informações dentro do site da base de dados a fim de melhor compreender o ciclo de vida de cada material.

Já a coleta de dados relativa a algumas etapas do ciclo de vida de uma edificação em CLT foram determinantes para a elaboração deste trabalho, tal como a etapa de construção ou montagem da edificação, que compreende a etapa A4 da Avaliação do Ciclo de Vida, uma vez que esta precisa ser preenchida de modo manual e seu levantamento precisa ser elaborado em um processo separado.

Alie-se a isso a dificuldade em levantar dados relativos a montagem de edificações verticais em CLT, visto as grandes diferenças encontradas dentre algumas edificações que disponibilizam o tempo de montagem, mão de obra, uso de equipamentos, dentre outros, bem como a redução do tempo de montagem de edificações em CLT em virtude de um amadurecimento do processo logístico de construção em painéis pré-fabricados. Neste sentido, optou-se por não incluir esta etapa dentro da ACV deste trabalho, ainda que isto represente uma fragilidade do trabalho, visto as grandes diferenças nas técnicas de montagem de cada um dos três modelos.

Outro ponto a ser levantado é a inserção de materiais utilizados para a obra de alguns dos modelos e que são descartados posteriormente, como é o caso das chapas de madeira ou

compensado, usualmente utilizadas em estruturas de concreto moldadas *in loco*, como é o caso do modelo em concreto armado e do térreo do modelo em CLT, ou ainda as lajes propostas no modelo em bloco de concreto.

Também os resíduos gerados em obra não foram contabilizados neste estudo, visto que, o software *Tally* gera os impactos da edificação a partir do quantitativo de materiais utilizados em obra, sendo que, durante a modelagem são contemplados apenas os materiais que permanecem na edificação, não sendo inseridos dados a respeito daqueles desperdiçados durante a obra ou de resíduo, o que, por fim, pode ser visto como uma fragilidade do trabalho, em virtude de algumas técnicas construtivas apresentarem maior quebra e geração de resíduos do que outras.

### 7.3 LIMITAÇÕES ENCONTRADAS NOS SOFTWARES E PLUGINS UTILIZADOS

Como mencionado anteriormente, a dificuldade no funcionamento dos plugins utilizados e a dificuldade em encontrar tutoriais e soluções para os problemas encontrados foram a maior dificuldade em manusear os mesmos, principalmente o plugin *Autodesk Insight 360* (2019), visto os erros recorrentes durante o processo de envio do modelo para a simulação em nuvem da Autodesk.

Um dos elementos que apresentou dificuldades durante sua modelagem foram os encaixes entre os painéis de CLT, visto a dificuldade em modelar elementos metálicos como parafusos e chapas metálicas aplicados a peças de madeira como são os painéis de CLT, além da dificuldade de fazer com que componentes importados de parafusos e conectores fossem lidos e incluídos na planilha de materiais de *Tally*, sendo necessário adaptar o quantitativo deste material e fazer sua aplicação como um material estrutural genérico a partir da quantificação do volume de metal utilizado para tal finalidade.

Ainda a criação de parâmetros de uso a serem utilizados para os ambientes dentro da edificação foram um fator dificultante, visto que, a normativa brasileira aponta o uso de dados de utilização de iluminação e equipamentos de energia em dados que consideram as diferenças entre dias de semana e finais de semana e em valores unitários por equipamentos, no entanto, os dados de entrada de energia em *Revit 2019* são feitos por meio de planilhas que consideram o uso diário padrão com 24 horas e considera o uso de equipamentos totais dentro de cada cômodo, conforme as normas americanas (ASHRAE, 2009), assim, foi necessário converter os

dados de entrada disponíveis pela normativa brasileira para aqueles aceitos em *Autodesk Revit 2019*.

Já com relação ao inventário e aos cálculos da ACV em *Tally*, a dificuldade em rastrear os cálculos relativos ao impacto de cada material é um ponto nodal do trabalho, pois, apesar de ser gerado um relatório e uma planilha com os dados finais do impacto relativo a cada material, fase, não é possível verificar ou alterar os cálculos que levaram a este resultado. Ainda que alguns softwares de ACV tenham um mesmo processo de elaboração de cálculos e geração de resultados, a falta de rastreabilidade pode gerar questionamentos com relação aos resultados apresentados.

Ainda com relação aos resultados obtidos em *Tally*, é possível inferir que não havendo substituição de um material, este não tem nenhum gasto energético ou emissão de gases durante o período de uso da edificação, compreendido entre as fases B2 a B5, neste sentido, é de interesse que a prevenção e os processos de manutenção, reparo ou reforma nos materiais e sistemas possam ser previstas pelo plugin em versões mais aprimoradas.

No entanto, apesar de pontuar diversos pontos de dificuldade com relação ao uso de plugins de sustentabilidade em BIM (6D), é importante ressaltar que seu uso ainda tem muito a evoluir, e que o desenvolvimento destes plugins podem auxiliar de maneira rápida e precisa os designers de edificações durante o processo de tomada de decisão. Assim, permitindo que critérios ambientais e de sustentabilidade possam fazer parte do escopo de análise para edificações.

Outro ponto positivo que deve ser ressaltado é a facilidade em manusear o plugin *Tally* e em interpretar os resultados, o que permite que este seja utilizado de maneira bastante prática por profissionais da área que pretendem utilizar critérios ambiental durante a escolha de materiais do projeto de uma edificação. Sendo que, caso fosse necessário fazer este processo em outro sistema, ou de outra maneira, com importação de dados e com a conferência manual, o processo de Avaliação de Ciclo de Vida se tornaria morosa e dificultosa, restringindo seu uso a profissionais especializados no assunto e, portanto, reduzindo o acesso a informações deste cunho como critério de avaliação.

#### 7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações encontradas ao longo do processo de elaboração deste estudo, a seguir são pontuadas sugestões para estudos posteriores acerca do tema abordado ao longo

desta pesquisa do uso do CLT em edificações verticais no Brasil e com relação ao seu impacto ambiental:

- Elaborar a ACV a partir de um projeto de edificação vertical que seja inicialmente projetado em CLT e então o transformar para o uso de outras técnicas construtivas, fazendo o processo inverso ao desta pesquisa;
- Simular o consumo energético dos modelos em diferentes técnicas construtivas por meio do uso de outro software de acordo com as normas brasileiras;
- Elaborar o levantamento do consumo energético e emissão de dióxido de carbono relativos à etapa de montagem de uma edificação em CLT;
- Elaborar a Avaliação do Ciclo de Vida dos painéis de CLT de acordo com a produção nacional, fazendo um inventário e acompanhando todas as fases de extração, processamento, montagem e transporte do material;
- Aprofundar os estudos relativos ao cálculo estrutural de estruturas autoportantes em madeira, tal como é o CLT e definir modulações adequadas para sua adaptação em projetos de modo geral;
- Comparar ACV de edificações em CLT com base em diferentes bases de dados e por meio da utilização de diferentes métodos de cálculo para fins comparativos e certificação de que os valores estão em concordância com os resultados obtidos por meio do uso de plugins em BIM para ACV;
- Levantar os rejeitos produzidos pelos três modelos para fins comparativos, uma vez que cada técnica construtiva tem um diferente processo de produção, montagem ou construção e que, portanto, produz diferentes tipos de rejeitos e em diferentes proporções.
- Investigar o papel das colas no processo de montagem dos painéis e o percentual de representatividade nos impactos gerados pelo material.

## REFERÊNCIAS

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12721**: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. **NBR ISO 14040** - Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida: princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220:2** Desempenho térmico das edificações parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_. **NBR 15220:3** Desempenho térmico das edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005b.

\_\_\_\_\_. **NBR 15575:1** Edificações Habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_. **NBR 7190**: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

AHVENAINEN J., SOUSA H.S. **Multistorey building made of CLT: How to design it right?** Capítulo do livro Construir em madeira. Publicado pela Universidade do Minho, pp.95-118. 2016.

ALENCAR J.B.M., MOURA J.D.M. **Qualidade da adesão da madeira de pinus e eucalipto para produção de painéis estruturais cross laminated timber (CLT)**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Maceió, 2014.

ARCHDAILY BRASIL. **O maior edifício de CLT no mundo em um modelo para habitações de alta densidade**. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/903936/o-maior-edificio-de-clt-no-mundo-e-um-modelo-para-habitacoes-de-alta-densidade>. Acesso em: 02/01/2019a.

ARCHDAILY BRASIL. **Mjøstårnet na Noruega será a estrutura de madeira mais alta do mundo**. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/888896/mjostarnet-na-noruega-sera-a-estrutura-de-madeira-mais-alta-do-mundo>. Acesso em: 30/05/2019b.

ARCHDAILY BRASIL. **Triptyque divulga projeto de edifício escalonado de madeira certificada na Vila Madalena**. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/879936/triptyque-divulga-projeto-de-edificio-escalonado-de-madeira-certificada-na-vila-madalena>. Acesso em: 30/05/2019c.

ARCHDAILY. **International House Tzannes**. Disponível em: <https://www.archdaily.com/871807/international-house-tzannes>. Acessado em 02/01/2019d.

ARCHITECTURE. **Trafalgar Place Elephant and Castle**. Disponível em: <https://www.architecture.com/awards-and-competitions-landing-page/awards/riba-regional-awards/riba-london-award-winners/2017/trafalgar-place-elephant-and-castle>. Acesso em 01/05/2019.

ARCHITECTURE AU. **Australia to get first comercial timber office building at Barangaroo**. Disponível em: <https://architectureau.com/articles/international-house-sydney/>. Acesso em: 30/12/2019.

ARCHITECT MAGAZINE. **Innovative detail Wood Innovation and Design Centre**. Disponível em: [https://www.architectmagazine.com/technology/detail/innovative-detail-wood-innovation-and-design-centre\\_o](https://www.architectmagazine.com/technology/detail/innovative-detail-wood-innovation-and-design-centre_o). Acesso em: 01/05/2019a.



ARCHITECT MAGAZINE. **T3 Becomes the First Modern Tall Wood Building in U.S.** Disponível em: [https://www.architectmagazine.com/technology/t3-becomes-the-first-modern-tall-wood-building-in-the-us\\_o](https://www.architectmagazine.com/technology/t3-becomes-the-first-modern-tall-wood-building-in-the-us_o). Acesso em: 21/04/2018b.

ASDRUBALI F., FERRACUTI B., LOMBARDI L., GUATTARI C., EVANGELISTI L., GRAZIESCHI G., **A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications.** Building and Environment 114, 2017.

ASIF M., MUNEEB T., KELLEY R. **Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland.** Building and Environment, 42-3, p. 1391–1394, 2007.

ATLEE J. **Selecting safer building products in practice.** Journal of Cleaner Production 19, 2011.

AUTODESK REVIT. **OVERVIEW.** Disponível em <https://www.autodesk.com.br/products/revit/overview> . Acesso em: 26/02/2019.

AZEVEDO, N. C. **Avaliação do ciclo de vida energético e de CO<sub>2</sub> através da modelagem da informação da construção (BIM) e simulação termo energética de uma habitação unifamiliar em wood frame.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

AZZOUZ A., BORCHERS M., MOREIRA J., MAVROGIANNI A. **Life cycle assessment of energy conservation measures during early stage office building design: A case study in London, UK.** Energy and Buildings 139, p. 547-568, 2017.

BRANDNER R., **Production and Technology of Cross Laminated Timber (CLT): A state-of-the-art Report (2013).** Disponível em: [https://online.tugraz.at/tug\\_online/voe\\_main2.getVollText?pDocumentNr=331182&pCurrPk=71276](https://online.tugraz.at/tug_online/voe_main2.getVollText?pDocumentNr=331182&pCurrPk=71276). Acessado em 29/10/2018.

BRATKOVICH S., HOWE J., BOWYER J., PEPKE E., FRANK M., FERNHOLZ K. **Municipal Solid Waste (MSW) and Construction and Demolition (C&D) Wood Waste Generation and Recovery in the United States.** Dovetail Partners Inc., 2014.

BERNASCONI A. **Timber construction in the city of Milan- 4 residential buildings with 9 storey.** European Wood Network Meeting, 2012.

BERGE B. **The Ecology of Building Material.** Second Edition. 2009.

BERNHEIMER A., **Timber in the City Design and Construction in mass Timber.** 2015. Manual técnico.

BLENGINI, G.A.; DI CARLO, T. **The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings.** Energy and Buildings 42, p. 869–880, 2010.

BRENEMAN S., TIMMERS M., JOHN A. MARTIN & ASSOCIATES, RICHARDSON D. **Tall Wood Buildings and the 2021 IBC: Up to 18 Stories of Mass Timber.** WoodWorks. 2019.

BRIBIÁN, I.Z., USÓN A. A., SCARPELLINI S. **Life cycle assessment in building: State-of-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification.** Building and Environment 44, 2009.

BSI, BS EN 15978:2011, **Sustainability of Construction Works — Assessment of Environmental Performance of Buildings — Calculation Method,** 2011.

BUCHANAN A., DEAM B., FRAGIACOMO M., PAMPANIN S., PALERMO A. **Multistorey prestressed timber buildings in New Zealand.** Structural Engineering International, 18, p. 166–173, 2008.

CABRERO J.M., IRAOLA B., YURRITA M. **Failure of timber constructions. In Handbook of Materials Failure Analysis;** Makhoul, A.S.H., Aliofkhaezrai, M., Eds.; Butterworth-Heinemann: Oxford, UK, p. 123–152, 2018.

CAMPOLINA J.M., SIGRIST C.S.L., MORIS V.A.S. **Uma revisão de literatura sobre softwares utilizados em estudos de Avaliação de Ciclo de Vida**. REGET- UFSC Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, V.19, n. 2, p. 735-750, 2015.

CASTRO, S. C. L. de. **O uso da Madeira em construções habitacionais: a experiência do passado e a perspectiva de sustentabilidade no exemplo da arquitetura chilena**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2008.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – CB3E. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. **Ensaio de Condutividade Térmica. Relatório no 282/2014**. Florianópolis/SC, 2014.

CHEN Y.J. **Comparison of environmental performance of a fivestorey building built with cross-laminated timber and concrete**. Tese do Department of Wood Science, 2012.

CNA Brasil (Confederação Nacional da Agricultura). **O Brasil é um dos maiores produtores de florestas plantadas no mundo**. Disponível em: <http://www.cnabrazil.org.br/noticias/o-brasil-e-um-dos-maiores-produtores-de-florestas-plantadas-do-mundo> Acesso em: 09 de abril de 2018.

CSA 086-14. **Engineering Design in Wood, Structural Design Provision for Mid-Rise CLT Design Information Summary**. CSA, 2014.

CROSSLAM. **Cross Laminated Timber Informações Técnicas**. 2019. Disponível em: [www.crosslam.com.br](http://www.crosslam.com.br).

COSTA A. A. P. da, **Construções de edifícios com CrossLaminated Timber (CLT)**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil- Especialização em Construção Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto- Portugal, 2013.

D'AGOSTINHO D., **Assessment of the progress toward the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (NZEBS) in European Member States**. Journal of Building Engineering v.01, 2015.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., **DIN 68800-2 - Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings**. European standard, 2012.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; JÚNIOR, J. A. V. A. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

DONG Y., CUI X., YIN X., CHEN Y., GUO H., **Assessment of Energy Saving Potential by Replacing Conventional Materials by Cross Laminated Timber (CLT)—A Case Study of Office Buildings in China**. Applied Sciences, 9 (5), 2019.

DOVETAIL PARTNERS. **Modern Tall Wood Buildings: Opportunities for Innovation**. Relatório técnico, 2016.

ECOINVENT CENTER. **The ecoinvent database V3.01**. January 23, 2014. Available online at: <http://ecoinvent.org/database/>.

EHRHART T., BRANDNER R. **Rolling shear: Test configurations and properties of some European soft- and hardwood species**. Engineering Structures 172, 2018.

EN 15978:2011, **Sustainability of Construction Works — Assessment of Environmental Performance of Buildings — Calculation Method**. European Standard, CEN, Bruxelas, 2011.

EN 16351:2015, **Timber structures, Cross laminated timber, Requirements**. European Standard, CEN, Brussels, October 2015.

EN 1995:2004, **Eurocode 5. Design of timber structures. General**. Common rules and rules for buildings. European Standard, CEN, Bruxelas, 2004.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2019**. Rio de Janeiro, 2019.

EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL. **ETA-11/0295 - Three-dimensional nailing plate (joist end connector for wood to wood connections and wood to concrete or steel connections)**. Danmark, p. 1-43, 2013.

EVANGELISTA, P.P.A.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E.A.; GONÇALVES, J.P. **Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA)**. Construction Building Materials 169, 2018.

FAO FORESTRY PAPER. **Global forest resource assessment 2010** (Forestry Paper 163). Roma, 2010. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>. Acesso em: 07 maio 2015.

GABI. Base de dados de Avaliação de Ciclo de Vida. <http://www.gabi-software.com/>. Acesso em 30/12/2019.

GAZETA DO POVO. **O impressionante projeto do maior prédio em madeira, com 350 metros de altura**. Disponível em: <https://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/edificio-madeira-canada-floresta-vertical-sustentabilidade/> Acesso em: 04/05/2018a.

GAZETA DO POVO. **Maior prédio de madeira do mundo será construído em Tóquio**. Disponível em: [http://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/maior-predio-de-madeira-do-mundo-sera-construido-em-toquio/?utm\\_source=facebook&utm\\_medium=midia-social&utm\\_campaign=haus](http://www.gazetadopovo.com.br/haus/arquitetura/maior-predio-de-madeira-do-mundo-sera-construido-em-toquio/?utm_source=facebook&utm_medium=midia-social&utm_campaign=haus). Acesso em: 21/04/2018b.

GIESEKAM J., BARRETT J.R., TAYLOR P., **Construction sector views on low carbon building materials**, Building Research & Information, p. 1-23, 2015.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2009.

GREEN, M. **The Case for Tall Wood Buildings (book)**, first edition, 2012.

GREEN BUILDING STUDIO. **Welcome Green Building Studio**. Disponível em: <https://gbs.autodesk.com/GBS/>. Acesso em: 31/05/2019.

GREENSPEC. **Crosslam timber / CLT – Performance characteristics**. Disponível em: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/crosslam-timber-performance-characteristics/>. Acesso em: 16/11/2019.

GREVEN H.A., BALDAUF A.S.F. **Introdução à coordenação modular da construção no Brasil** Uma abordagem atualizada. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

HACKENTHAL J.U.S. **Lessons from an Italian Hotel Experience**. (2013). Disponível em: <http://www.woodworks.org/wpcontent/uploads/CLT-Hackenthal.pdf>

HAFNER A., SCHAFER S. **Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level**. Journal of Cleaner Production 167, p. 630-642, 2017.

HAMMOND G.P., JONES C.J. **Embodied energy and carbono in construction materials**. Proc. Institut. Civ. Eng. Energy 161, 2008.

HARRIS R., **8 - Cross laminated timber A2** - Ansell, Martin P, in: Wood Composites, Woodhead Publishing, pp. 141-167, 2015.

HILGENBERG NETO, M. F. **Estudo de viabilidade técnico/econômica da casa de madeira popular no Estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

HONDA, W.S., **Certificação da sustentabilidade de edifícios de escritórios corporativos no Brasil**. São Paulo. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

HUEY TEH S., WIEDMANN T., SCHINABECK J., MOORE S. **Replacement scenarios for construction materials based on economy-wide hybrid LCA**. Procedia Engineering 180, p. 179 – 189, 2017.

IBN-MOHAMMED T., GREENOUGH R., TAYLOR S., OZAMA-MEIDA L., ACQUAYE A., **Operational vs. embodied emissions in buildings—a review of current trends**, Energy Build. 66, p. 232–245, 2013.

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, PÖYRY CONSULTORIA EM GESTÃO E NEGÓCIOS LTDA. **Relatório anual 2016**. Disponível em: <http://iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes>. Acesso em: 09 de abril de 2018.

IBA - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, PÖYRY CONSULTORIA EM GESTÃO E NEGÓCIOS LTDA. **Relatório anual 2017**. Disponível em: <http://iba.org/pt/biblioteca-iba/publicacoes>. Acesso em: 09 de abril de 2018.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Data and Statistics**. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics>. Acesso em: 19 de dezembro de 2019.

INEXHIBIT. **A+ Architecture | Lucien Cornil Student Residence, Marseille**. Disponível em: <https://www.inexhibit.com/case-studies/a-architecture-lucien-cornil-student-residence-8-story-clt-building/>. Acesso em: 21/04/2018.

INHABITAT. **Peek inside the tallest Cross-laminated timber building in the US**. Disponível em: <https://inhabitat.com/peek-inside-the-tallest-cross-laminated-timber-building-in-the-us/>. Acesso em: 12/06/2019.

INVIDIATA A., LAVAGNA M., GHISI E., **Selecting design strategies using multi-criteria decision making to improve the sustainability of buildings**. Building and Environment 139, p. 58–68, 2018.

INSIGHT- BUILDING PERFORMANCE ANALYSIS SOFTWARE. **Insight feature**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/insight/overview>. Acesso em: 12/05/2019.

IP K., MILLER A., **Life cycle greenhouse gas emissions of hemp–lime wall constructions in the UK**. Resources, Conservation and Recycling, 69, p. 1–9, 2012.

IPCC, **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in: T.C.W. Team, R.K. Pachauri, L. Meyer, (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.**

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION (ISO). **ISO 14040 – Environmental management – life cycle assessment – principles and framework**. 2006.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION (ISO). **ISSO 21930 – Sustainability in building and civil engineering Works – Core rules for environmental products declaration of construction products and services**. 2017.

IZZI M., CASAGRANDE D., BEZZI S., PASCA D., FOLLESA M., TOMASI R. **Seismic behaviour of Cross-Laminated Timber structures: A state-of-the-art review**. Engineering Structures 170, p. 42–52, 2018.

JOHN S., NEBEL B., PEREZ N., BUCHANAN A.H. **Environmental Impacts of Multi-storey Building Using Different Construction Materials**. Report. Department of Civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury, Christchurch, Nova Zelandia, 2009.

KARACABEYLI E., DOUGLAS B. **CLT Handbook: Cross-Laminated Timber**. US Edition, FP Innovations, 2013.

KLH MASSIVHOLZ GMBH. **Cross-Laminated Timber made for building built for living**. Teufenbach-Katsch- Austria, 2018.

KOVACIC I., REISINGER J., HONIC M. **Life Cycle Assessment of embodied and operational energy for a passive housing block in Austria**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 82-2, p. 1774–1786, 2018.

KUILEN J.W.G.V., CECCOTTI A., XIAC Z., HE M., **Very Tall Wooden Buildings with Cross Laminated Timber**. Procedia Engineering 14, p. 1621–1628, 2011.

KUMAR PAL S., TAKANO A., ALANNE K., PALONEN M., SIREN K., **A multi-objective life cycle approach for optimal building design: A case study in Finnish context**, Journal of Cleaner Production 143, p. 1021–1035, 2017.

LADIBUG TOOLS. **What is Ladybug?** Disponível em: <https://www.ladybug.tools/>. Acesso em: 21/05/2019.

LARSSON M., KAISER A., GIRHAMMAR U. A. **WCTE - World Conference on Timber Engineering**, Session 47, Futures Trend, Nova Zelandia, 2012.

LE MONITEUR. **A 38 metres de haut le bois fait Sensations a Strasbourg**. Disponível em: <https://www.lemoniteur.fr/article/a-38-metres-de-haut-le-bois-fait-sensations-a-strasbourg.1958389>. Acesso em: 07/06/2019.

MAHLUM ARCHITECTS, WALSH CONSTRUCTION, COUGLIN PORTER LUNDEEN, **CLT Feasibility Study: A Study of Alternative Construction Methods in the Pacific Northwest**, 2014.

MALLO M. F. L., ESPINOZA O. **Outlook for CLT**. BioResources 9(4), p. 7427-7443, 2014.

MALLO M. F. L., ESPINOZA O. **Awareness, perception and willingness to adopt Cross-Laminated Timber by the architecture community in the United States**. Journal of Cleaner Production 94, p. 198-210, 2015.

MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 7 ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MARCOS, M. H. C. **Análise da emissão de CO2 na fase pré-operacional em habitações de interesse social, através da utilização de uma ferramenta CAD-BIM**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MOHURD- MINISTRY OF HOUSING AND URBAN-RURAL DEVELOPMENT. **Six ways to promote building energy efficiency of China**. Disponível em: [http://www.gov.cn/jrzq/2009-03/06/content\\_1252485.htm](http://www.gov.cn/jrzq/2009-03/06/content_1252485.htm). Acesso em: 12/06/2019.

MOHAMMAD M., GAGNON S., KARACABEYLI E., POPOVSKI M. **Innovative Mid-rise timber Structures Offer New Opportunities for Designers**. Structural Engineers Association California, SEAOC 2011, CONVENTION PROCEEDINGS, 2011.

MONCASTER A.M., POMPONI F., SYMONS K.E., GUTHRIE P.M. **Why method matters: Temporal, spatial and physical variations in LCA and their impact on choice of structural system**. Energy & Buildings 173, p. 389–398, 2018.

MONICH C. R. **Avaliação ambiental de uma habitação de interesse social pré-fabricada em madeira no sistema *wood frame* no estado do Paraná**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MOREIRA J.M.M.A.P., SIMIONI F.J., OLIVEIRA E.B. **Importância e desempenho das florestas plantadas no contexto do agronegócio brasileiro**. Revista Floresta, Curitiba, PR, v. 47, 2017.

NEW ZEALAND GREEN BUILDING COUNCIL. **Green Star**, manual v3.1. 2016. Manual técnico.

NIST- NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (U.S. DEPARTMENT OF COMERCE), **American Softwood Lumber Standard, Supersedes Voluntary Product Standard PS 20-10**, 2015.

NOVAK M.W., KOPPELHUBER J., POCK K. **Cross-Laminated Timber Structural Timber: Basic design and engineering principles according to Eurocode**, *proHolz Austria*, 2014.

OLIVEIRA, Eloise de. **Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e o CO2 embutidos no sistema construtivo *wood frame***. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.



ONE CLICK LCA. **One Click LCA Welcome to One Click LCA.** Disponível em: <https://www.oneclicklca.com/construction/>. Acesso em 05/05/2019.

ONG EUROPEAN WOOD. **Copperhill Mountain Lodge.** Disponível em: <https://www.europeanwood.org.cn/cms/page/en/commercial-case-studies/42>. Acesso em 21/04/2018.

PASSARELLI R.N. **Cross laminated timber: diretrizes para projeto de painel maciço em madeira no estado de São Paulo.** Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

PBE Edifica. **Manual para aplicação do RTQ-R – Residencial**, 2012.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **DATEC nº 020-C – Sistema Construtivo em peças leves de madeira serrada – TECVERDE: Tipo light wood frame.** Brasília: Ministério das Cidades, 2018a.

PBQP-H, Programa Brasileiro de Qualidade e Produtividade do Habitat. **Programa Setoriais da Qualidade: Sistema de Qualificação de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC).** Brasília: Ministério das Cidades. Disponível em: [http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_simac\\_psq.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_simac_psq.php). Acesso em: dezembro de 2018b.

PEIXE, M.A. **Uma linguagem de padrões para a madeira conjunto de práticas projetuais para a valorização plástica, técnica e funcional do uso desse material.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PEÑALOZA D., ERLANDSSON M., FALK A. **Exploring the climate impact effects of increased use of bio-based materials in buildings.** Construction and Building Materials 125, p. 219–226, 2016.

PENG C. **Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling.** Journal of Cleaner Production 112, p. 453–465, 2014.

PEREIRA M.C.M. **Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis.** Dissertação (Mestrado)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PROCEL; ELETROBRÁS. **Tabela de estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético.** 2015. Disponível em: <[HTTP://www.industriahoje.com.br/wp-content/uploads/downloads/2015/01/Tabela-Consumo-Equipamentos-Procet-Eletobras.pdf](http://www.industriahoje.com.br/wp-content/uploads/downloads/2015/01/Tabela-Consumo-Equipamentos-Procet-Eletobras.pdf)> Acesso em: 11/11/2019.

PRODLIB. **Search Stora enso.** Disponível em: <https://www.prodlib.com/> Acesso em: 10/01/2019.

QUEBEC. **Mass timber buildings of up to 12 storeys, Directives and Explanatory Guide.** Manual técnico. Gouvernement du Québec, 2015.

RAMAGE M. H., BURRIDGE H., BUSSE\_WICHER M., FEREDAY G., REYNOLDS T., SHAH D., WU G., YU L., FLEMING P., DENSLEY\_TINGLEY D., ALLWOOD J., DUPREE P., LINDEN P.F., SCHERMAN O. **The wood from the trees: The use of timber in construction.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 68, p. 333–359, 2017.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K.K. **Life cycle energy analysis of buildings: An overview.** Energy and Buildings 42, p. 1592–1600, 2010.

REIULF RAMSTAD ARCHITECTS. **Barents House.** Disponível em: <http://www.reiulframstadarchitects.com/barents-house/> Acesso em: 21/04/2018.

ROBERTSON A.B., LAM F.C., COLE R.J. **A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete.** Buildings 2 (3), 2012.

ROBSON C. **Real world research: a resource for social scientists and practitionerresearches.** 2 ed. Blackwell Publishing, 2002.

ROSSO T. **Racionalização da construção**. São Paulo: FAUUSP, 1980.

ROTHOBLAAS. **Laminado de madeira cruzada**. Disponível em: <https://www.rothoblaas.pt/laminado-de-madeira-cruzada>. Acesso em 30/12/2018.

Rouleau J., Gosselin L., Blanchet P. **Understanding energy consumption in high-performance social housing buildings: A case study from Canada**. Energy 145, p. 677-690, 2018.

ROYNE F., PEÑALOZA D., SANDIN G., BERLIN J. **Climate impact assessment in life cycle assessment of forest products: Implications of method choice for results and decision-making**. Journal of Cleaner Production 116, p. 90-99, 2006.

SALAZAR J., MEIL J. **Prospects for carbon-neutral housing: the influence of greater wood use on the carbon footprint of a single family residence**. Journal of Cleaner Production 17, p. 1563 – 1571, 2009.

SANDANAYAKE M., LOKUGEB W., ZHANG G., SETUNGE S., THUSHAR Q. **Greenhouse gas emissions during timber and concrete building construction —A scenario based comparative case study**. Sustainable Cities and Society 38, p. 91-97, 2018.

SANDANAYAKE, M., ZHANG, G., SETUNGE, S., LI, C.-Q., FANG, J. **Models and method for estimation and comparison of direct emissions in building construction in Australia and a case study**. Energy and Buildings, 126, p. 128-138, 2016.

SILVA C.A., CHIRINÉA M.L.B., BARROS M.M.S.B. **Cross laminated timber: uma tecnologia construtiva viável no Brasil?** XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo, 2016.

SIKORA K.S., MCPOLIN D.O., HARTE A.N.M. **Effects of the thickness of cross-laminated timber (CLT) panels made from Irish Sitka spruce on mechanical performance in bending and shear**. Construction and Building Materials 116, p. 141 – 150, 2016.

SINDUSCON MG (SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO ESTADO DE MINAS GERAIS). **Custo Unitário Básico (CUB/m²): principais aspectos**. Belo Horizonte: SINDUSCON-MG, 2007. 112p.

JACEK S. P., FREDERICK W.C., RUKUNUDDIN A.M. **Sustainable forest management: global trends and opportunities**. For Policy Econ, 2005.

SKIDMORE O.A.M. **Timber tower research Project**. Disponível em: [http://www.som.com/ideas/research/timber\\_tower\\_research\\_project](http://www.som.com/ideas/research/timber_tower_research_project). Acesso em: 30/12/2018.

SKULLESTAD J.L., BOHNE R.A., LOHNE J. **High-Rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure - A Comparative LCA of Structural System Alternatives**. Energy Procedia 96, p. 112 – 123, 2016.

SOUST-VERDAGUER, B., LLATAS, C., & GARCÍA-MARTÍNEZ, A. **Critical review of bim-based LCA method to buildings**. Energy and Buildings 136, p. 110-120, 2017.

STAZI F., TOMASSONI E., BONFIGLI C., PERNA C. DI. **Energy, comfort and environmental assessment of different building envelope techniques in a Mediterranean climate with a hot dry summer**. Applied Energy 134, p. 176-196, 2014.

STAUDER C. **Cross-Laminated Timber “An analysis of the Austrian industry and ideas for fostering its development in America”**. Austrian Marshall Plan Foundation September, 2013.

STORA ENSO. **Building Systems by Stora Enso, Residential multi-storey buildings**. Stora Enso Division Wood Products, 2016.

STORA ENSO. **Via Cenni**. Disponível em: <https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2015/2/via-cenni>. Acesso em: 02/07/2019. 2015.



STRUCTURAL TIMBER ASSOCIATION. **Technical Bulletin 11. Cross-laminated Timber Construction- Na Introduction.** 2015. Disponível em: <http://www.structuraltimber.co.uk/library/>. Acesso em: 02/07/2019.

STÜRZENBECHER R., HOFSTETTER S., EBERHARDSTEINER J., **Structural design of Cross Laminated Timber (CLT) by advanced plate theories.** Composites Science and Technology 70, p. 1368–1379, 2010.

SUCCAR B., **Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders.** Automation in Construction 18, p. 357-375, 2009.

TAVARES, S. F. **Metodologia de Análise do Ciclo de Vida Energética de Edificações Residências Brasileiras.** Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006. 225f.

TAKANO A., HUGHES M., WINTER S. **A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context.** Building and Environment 82, p. 526 – 535, 2014a.

TAKANO A., WINTER S., HUGHES M., LINKOSALMI L., **Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment.** Building and Environment 79, p. 20-30, 2014b.

TAKANO A., KUMAR PAL S., KUITTINEN M., ALANNE K., HUGHES M., WINTER S. **The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland.** Building and Environment 89, p. 192 – 202, 2015a.

TAKANO A., KUMAR PAL A., KUITTINEN M., ALANNE K. **Life cycle energy balance of residential buildings: A case study on hypothetical building models in Finland.** Energy and Buildings 105, p. 154 – 164, 2015b.

TALLY. **Tally Overview.** Disponível em: <https://choosetally.com/overview/>. Acesso em: 05/05/2019.

TESHNIZI Z., PILON A., STOREV S., LOPEZ D., FROESE D.L. **Lessons Learned from Life Cycle Assessment and Life Cycle Costing of Two Residential Towers at the University of British Columbia.** 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, Copenhagen, Denmark, 2018.

THE INTERNATIONAL EPD SYSTEM. **What is an EPD?** Disponível em: <https://www.environdec.com/What-is-an-EPD/>. Acesso em 31/05/2019.

TISEM. **Manual de apresentação da empresa TISEM Portugal.** 2014. Apresentação. Figueira da Foz, Portugal.

UN-HABITAT, **State of the World's Cities 2010/2011.** United Nations Human Settlements Programme (UN-HABITAT), 2008.

VAN OEL P.R.P., HOEKSTRA A.Y. **The green and blue water footprint of paper products: Methodological considerations and quantification.** UNESCO IHE Institute for Water Education, Research Report Series No. 46, 2010.

ZHANG X.; POPOVSKI M.; TANNERT T. **High-capacity hold-down for mass-timber buildings.** Construction and Building Materials 164, p. 688–703, 2018.

YEHEYIS M., HEWAGE K., ALAM M.S., ESKICIOGLU C., Sadiq R. **An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability.** Clean Technol Environ. Policy, p. 81–91, 2012.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos.** Bookman. 3 ed. Porto Alegre, 2005.

WAUGH THISTLETON ARCHITECTS, **100 Projects UK CLT.** Softwood Lumber Board & Forestry Innovation Investment, 2018.

WANG L., TOPPINEN A., JUSLIN H. **Use of wood in green building: a study of expert perspective from the UK.** Journal of Cleaner Production 65, p. 350 – 361, 2013.

WGBC. **WorldGBC Annual Report 2015/2016**, relatório, 2016.

WITTSTOCK B., FISCHER M., BÖTTGE J., GANTNER J., OCKEL E., BRAUNE A. **Trends in building & construction life cycle assessment**. Proceedings of the sustainable buildings e construction products & Technologies SB13, p. 1004 – 1011, 2013.

WOOD RISE. **Projecs**. Disponível em: <http://woodrise.org/projets/>. Acesso em: 05/06/2019.

WOOD-WORKS. **Origine Pointe-Aux-Lièvres Ecocondos Quebec City, Cecobois**. 2018. Disponível em: [https://cecobois.com/publications\\_documents/CECO-11410\\_Etude\\_Cas\\_Origine\\_paysage\\_Ang\\_WEB.pdf](https://cecobois.com/publications_documents/CECO-11410_Etude_Cas_Origine_paysage_Ang_WEB.pdf). Acesso em: 05/06/2019.

WORLD WIDE FUND (WWF). **Living planet report 2018: Aiming higher**, 2018. Disponível em: <https://www.footprintnetwork.org/resources/publications/>.

WUFI. **What is Wufi?** Disponível em: <https://wufi.de/en/>. Acesso em 21/05/2019.

## ANEXOS 1 – RESULTADOS SIMULAÇÃO ACV- TALLY (CLT)

### MODELO EM CLT

Full building summary

04/01/2020

## Report Summary

**Created with Tally**  
Non-commercial Version 2018.09.27.01

**Goal and Scope of Assessment**  
ACV de uma edificação de oito pavimentos em CLT.

**Author** prof\_brunamidel  
**Company** UFPR  
**Date** 04/01/2020

**Project** MODELO EM CLT  
**Location** CENTRO POLITÉCNICO UFPR  
**Gross Area** 2161,10 m<sup>2</sup>  
**Building Life** 50

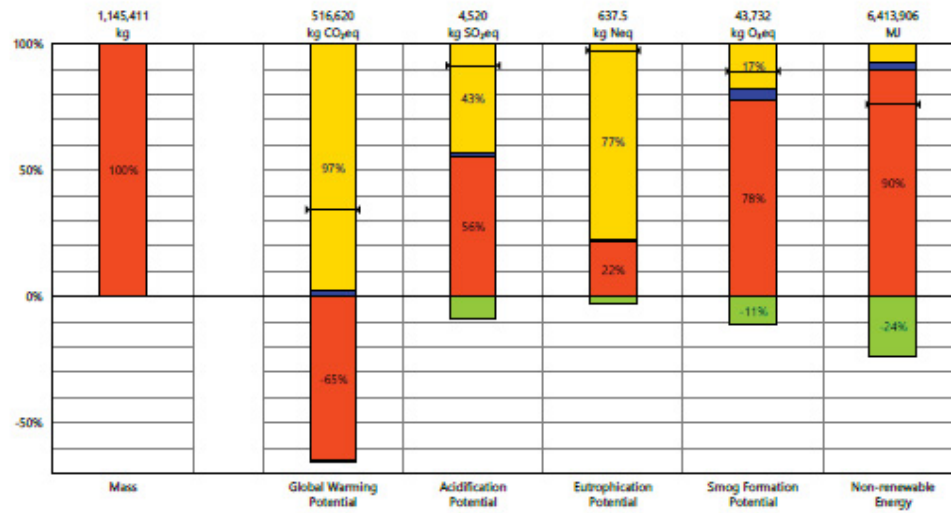
**Boundaries** Cradle to grave, inclusive of biogenic carbon; see appendix for a full list of materials and processes

**On-site Construction [A5]** Not included

**Operational Energy [B6]** Not included

	Product Stage [A1-A3]	Construction Stage [A4]	Use Stage [B2-B5]	End of Life Stage [C2-C4]	Module D [D]
<b>Environmental Impact Totals</b>					
Global Warming (kg CO <sub>2</sub> eq)	-335,523	14,031	0	502,588	-3,027
Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq)	2,512	65,02	0	1,943	-385
Eutrophication (kg Neq)	140,2	5,294	0	492,0	-15,5
Smog Formation (kg O <sub>3</sub> eq)	33,993	2,148	0	7,591	-4,662
Ozone Depletion (kg CFC-11eq)	0,0259	4,806E-010	0	6,465E-009	2,519E-004
Primary Energy (MJ)	1,092E+007	204,045	0	503,877	-2,309,155
Non-renewable Energy (MJ)	5,742,266	199,163	0	472,477	-1,529,775
Renewable Energy (MJ)	5,184,895	4,934	0	31,525	-783,681
<b>Environmental Impacts / Area</b>					
Global Warming (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	-155	6,493	0	232,6	-1,40
Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	1,162	0,03009	0	0,8991	-0,178
Eutrophication (kg Neq/m <sup>2</sup> )	0,06486	0,00245	0	0,2277	-0,007174
Smog Formation (kg O <sub>3</sub> eq/m <sup>2</sup> )	15,73	0,9941	0	3,513	-2,16
Ozone Depletion (kg CFC-11eq/m <sup>2</sup> )	1,199E-005	2,224E-013	0	2,992E-012	1,166E-007
Primary Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	5,055	94,42	0	233,2	-1,069
Non-renewable Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	2,657	92,16	0	218,6	-708
Renewable Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	2,399	2,283	0	14,59	-363

## Results per Life Cycle Stage

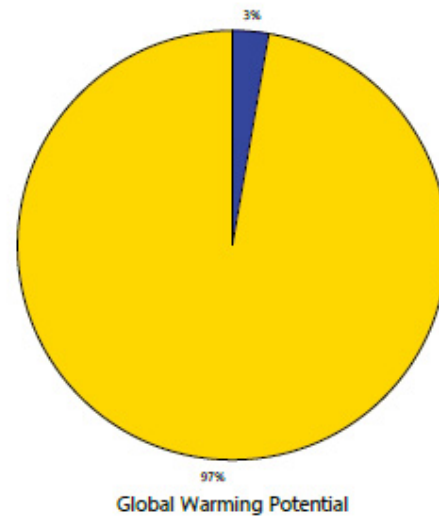


### Legend

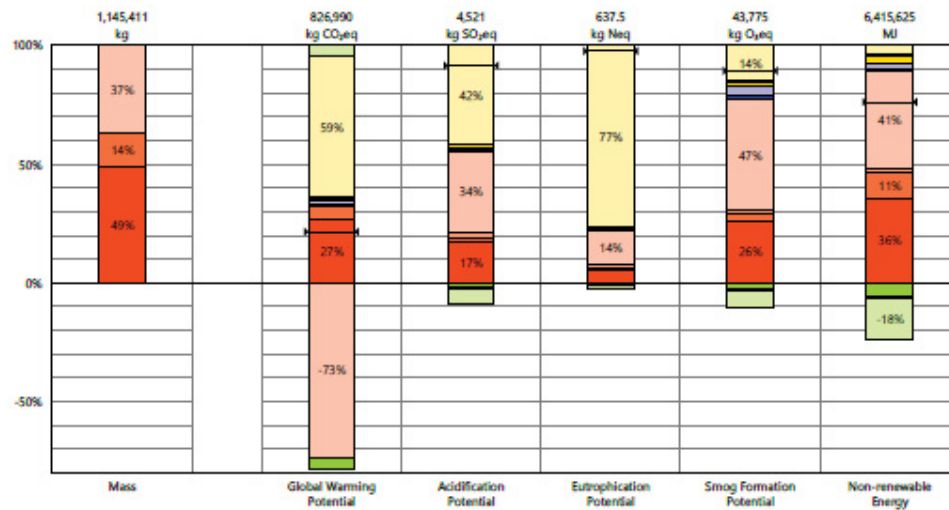
Net value (impacts + credits)

#### Life Cycle Stages

- Product [A1-A3]
- Transportation [A4]
- Maintenance and Replacement [B2-B5]
- End of Life [C2-C4]
- Module D [D]



### Results per Life Cycle Stage, itemized by Division



### Legend

Net value (impacts + credits)

#### Product [A1-A3]

- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites

#### Transportation [A4]

- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites

#### Maintenance and Replacement [B2-B5]

- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites

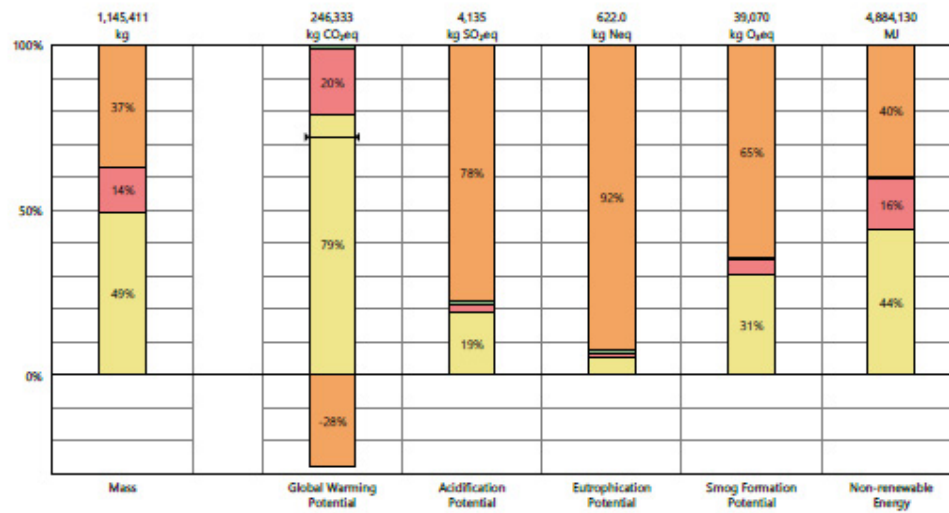
#### End of Life [C2-C4]

- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites

#### Module D [D]

- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites

## Results per Division

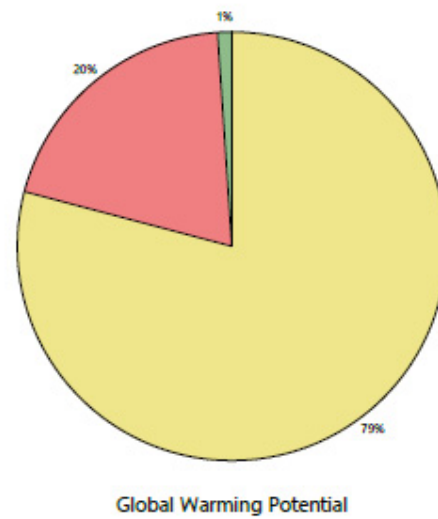


## Legend

Net value (impacts + credits)

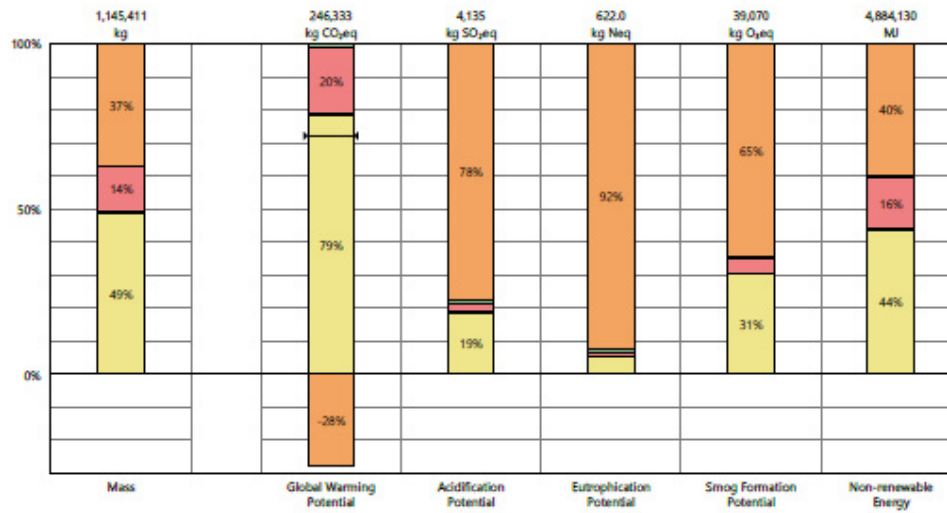
### Divisions

- 03 - Concrete
- 04 - Masonry
- 05 - Metals
- 06 - Wood/Plastics/Composites





### Results per Division, itemized by Tally Entry



### Legend

Net value (impacts + credits)

#### 03 - Concrete

- Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi
- Precast concrete structural panel, hollow core

#### 04 - Masonry

- Brick

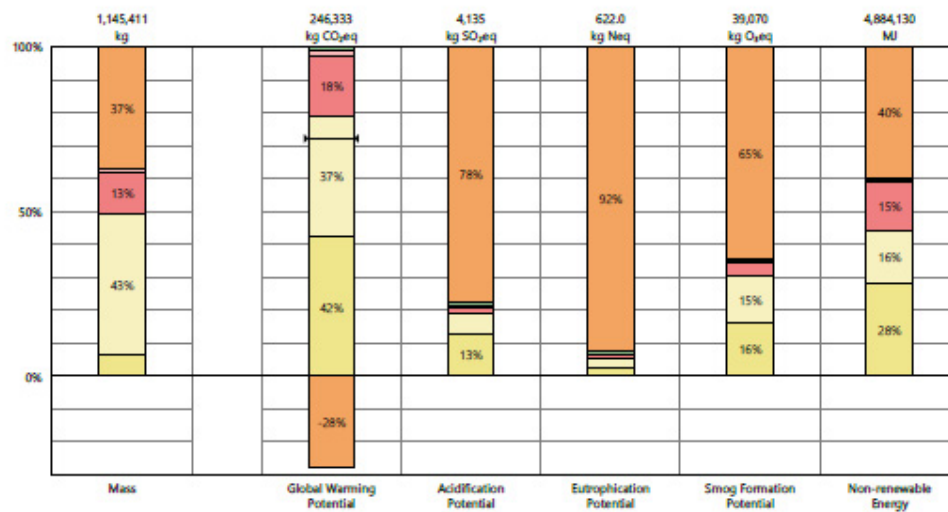
#### 05 - Metals

- Stainless Steel, Fasteners

#### 06 - Wood/Plastics/Composites

- Cross laminated timber (CLT)

### Results per Division, itemized by Material



### Legend

Net value (impacts + credits)

#### 03 - Concrete

- Steel, reinforcing rod
- Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag

#### 04 - Masonry

- Brick, generic
- Mortar type S

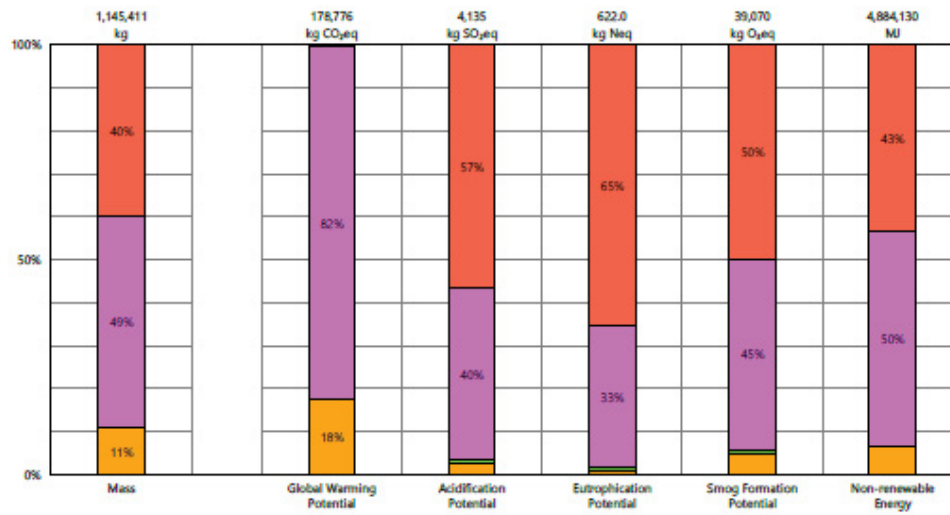
#### 05 - Metals

- Fasteners, stainless steel

#### 06 - Wood/Plastics/Composites

- CLT (Cross laminated timber)

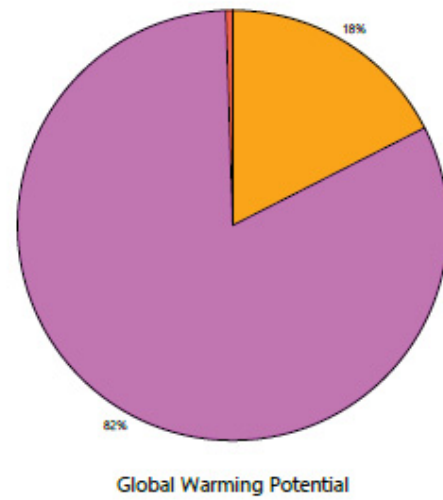
### Results per Revit Category



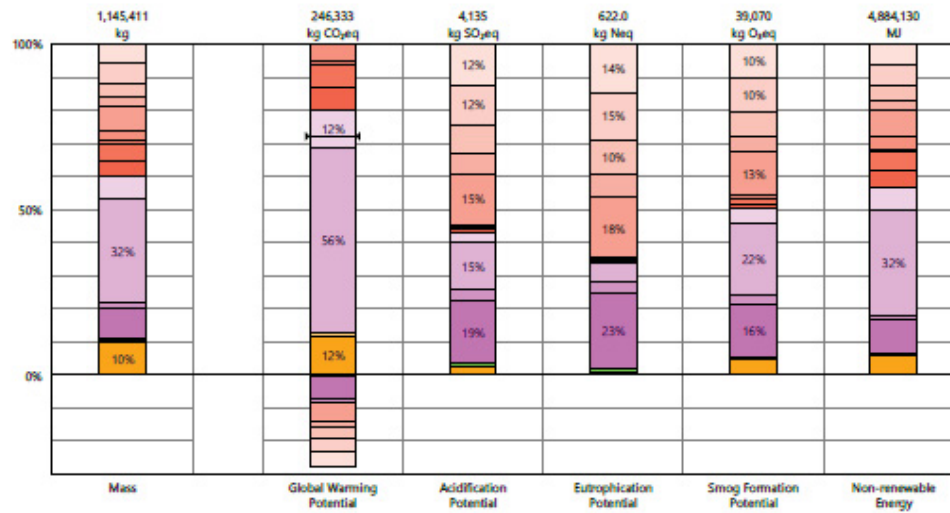
### Legend

Revit Categories

- Floors
- Stairs and Railings
- Structure
- Walls



### Results per Revit Category, itemized by Family



### Legend

Net value (impacts + credits)

#### Floors

- 15cm - Cerâmica 46x46cm
- 15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA

#### Stairs and Railings

- Escada

#### Structure

- L140 mm L5s
- L140 mm L5s- COBERTURA
- Pilar retangular
- viga

#### Walls

- Bloco Cerâmico 14cm- EXTERNAS
- Bloco Cerâmico 14cm- INTERNO
- Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE
- Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO
- L120 mm L5s- INTERIOR
- L140 mm L5s- EXTERNAS
- L160 mm L5s- EXTERNAS
- L180 mm L5s- NÚCLEO ESTRUTURANTE
- L180 mm L5s- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERIOR

## Calculation Methodology

### LIFE CYCLE ASSESSMENT METHODS

The following provides a description of terms and methods associated with the use of Tally to conduct life cycle assessment for construction works and construction products. Tally methodology is consistent with LCA standards ISO 14040-14044, ISO 21930:2017, ISO 21931:2010, EN 15804:2012, and EN 15978:2011. For more information about LCA, please refer to these standards or visit [www.choosetally.com](http://www.choosetally.com).

#### Studied objects

The life cycle assessment (LCA) results reported represent an analysis of a single building, multiple buildings, or a comparative analysis of two or more building design options. The assessment may represent the complete architectural, structural, and finish systems of the building(s) or a subset of those systems. This may be used to compare the relative environmental impacts associated with building components or for comparative study with one or more reference buildings. Design options may represent a full or partial building across various stages of the design process, or they may represent multiple schemes of a full or partial building that are being compared to one another across a range of evaluation criteria.

#### Functional unit and reference unit

A functional unit is the quantified performance of a product, building, or system that defines the object of the study. The functional unit of a single building should include the building type (e.g. office, factory), relevant technical and functional requirements (e.g. regulatory requirements, energy performance), pattern of use (e.g. occupancy, usable floor area), and the required service life. For a design option comparison of a partial building, the functional unit is the complete set of building systems or products that perform a given function. It is the responsibility of the modeler to assure that reference buildings or design options are functionally equivalent in terms of scope and relevant performance. The expected life of the building has a default value of 60 years and can be modified by the modeler.

The reference unit is the full collection of processes and materials required to produce a building or portion thereof and is quantified according to the given goal and scope of the assessment over the full life of the building. If construction impacts are included in the assessment, the reference unit also includes the energy, water, and fuel consumed on the building site during construction. If operational energy is included in the assessment, the reference unit includes the electrical and thermal energy consumed on site over the life of the building.

#### Data source

Tally utilizes a custom designed LCA database that combines material attributes, assembly details, and architectural specifications with environmental impact data resulting from the collaboration between KieranTimberlake and thinkstep. LCA modeling was conducted in GaBi 8.5 using GaBi 2018 databases and in accordance with [GaBi databases and modeling principles](#).

The data used are intended to represent the US and the year 2017. Where representative data were unavailable, proxy data were used. The datasets used, their geographic region, and year of reference are listed for each entry. An effort was made to choose proxy datasets that are technologically consistent with the relevant entry.

#### Data quality and uncertainty

Uncertainty in results can stem from both the data used and their application. Data quality is judged by: its measured, calculated, or estimated precision; its completeness, such as unreported emissions; its consistency, or degree of uniformity of the methodology applied on a study serving as a data source; and geographical, temporal, and technological representativeness. The [GaBi LCI databases](#) have been used in LCA models worldwide in both industrial and scientific applications. These LCI databases have additionally been used both as internal and critically reviewed and published studies. Uncertainty introduced by the use of proxy data is reduced by using technologically, geographically, and/or temporally similar data. It is the responsibility of the modeler to appropriately apply the predefined material entries to the building under study.

#### System boundaries and delimitations

The analysis accounts for the full cradle to grave life cycle of the design options studied across all life cycle stages, including material manufacturing, maintenance and replacement, and eventual end of life. Optionally, the construction impacts and operational energy of the building can be included within the scope. Product stage impacts are excluded for materials and components indicated as existing or salvaged by the modeler. The modeler defines whether the boundary includes or excludes the flow of biogenic carbon, which is the carbon absorbed and generated by biological sources (e.g. trees, algae) rather than from fossil resources.

Architectural materials and assemblies include all materials required for the product's manufacturing and use including hardware, sealants, adhesives, coatings, and finishing. The materials are included up to a 1% cut-off factor by mass except for known materials that have high environmental impacts at low levels. In these cases, a 1% cut-off was implemented by impact.



## Calculation Methodology

### LIFE CYCLE STAGES

The following describes the scope and system boundaries used to define each stage of the life cycle of a building or building product, from raw material acquisition to final disposal. For products listed in Tally as Environmental Product Declarations (EPD), the full life cycle impacts are included, even if the published EPD only includes the Product stage [A1-A3].

#### Product [EN 15978 A1 - A3]

This encompasses the full manufacturing stage, including raw material extraction and processing, intermediate transportation, and final manufacturing and assembly. The product stage scope is listed for each entry, detailing any specific inclusions or exclusions that fall outside of the cradle to gate scope. Infrastructure (buildings and machinery) required for the manufacturing and assembly of building materials are not included and are considered outside the scope of assessment.

#### Transportation [EN 15978 A4]

This counts transportation from the manufacturer to the building site during the construction stage and can be modified by the modeler.

#### Construction Installation [EN 15978 A5] (Optional)

This includes the anticipated or measured energy and water consumed on-site during the construction installation process, as specified by the modeler.

#### Maintenance and Replacement [EN 15978 B2-B5]

This encompasses the replacement of materials in accordance with their expected service life. This includes the end of life treatment of the existing products as well as the cradle to gate manufacturing and transportation to site of the replacement products. The service life is specified separately for each product. Refurbishment of materials marked as existing or salvaged by the modeler is also included.

#### Operational Energy [EN 15978 B6] (Optional)

This is based on the anticipated or measured energy and natural gas consumed at the building site over the lifetime of the building, as indicated by the modeler.

#### End of Life [EN 15978 C2-C4]

This includes the relevant material collection rates for recycling, processing requirements for recycled materials, incineration rates, and landfilling rates. The impacts associated with landfilling are based on average material properties, such as plastic waste, biodegradable waste, or inert material. Stage C2 encompasses the transport from the construction site to end-of-life treatment based on national averages. Stages C3-C4 account for waste processing and disposal, i.e., impacts associated with landfilling or incineration.

#### Module D [EN 15978 D]

This accounts for reuse potentials that fall beyond the system boundary, such as energy recovery and recycling of materials. Along with processing requirements, the recycling of materials is modeled using an avoided burden approach, where the burden of primary material production is allocated to the subsequent life cycle based on the quantity of recovered secondary material. Incineration of materials includes credit for average US energy recovery rates.

PRODUCT	CONSTRUCTION	USE	END-OF-LIFE	MODULE D
<b>A1. Extraction</b> <b>A2. Transport (to factory)</b> <b>A3. Manufacturing</b>	<b>A4. Transport (to site)</b> <b>A5. Construction Installation</b>	<b>B1. Use</b> <b>B2. Maintenance</b> <b>B3. Repair</b> <b>B4. Replacement</b> <b>B5. Refurbishment</b>  <b>B6. Operational energy</b> <b>B7. Operational water</b>	<b>C1. Demolition</b> <b>C2. Transport (to disposal)</b> <b>C3. Waste processing</b> <b>C4. Disposal</b>	<b>D. Benefits and loads beyond the system boundary from:</b> <b>1. Reuse</b> <b>2. Recycling</b> <b>3. Energy recovery</b>

Life-Cycle Stages as defined by EN 15978. Processes included in Tally modeling scope are shown in bold. Italics indicate optional processes.

## Calculation Methodology

### ENVIRONMENTAL IMPACT CATEGORIES

A characterization scheme translates all emissions and fuel use associated with the reference flow into quantities of categorized environmental impact. As the degree that the emissions will result in environmental harm depends on regional ecosystem conditions and the location in which they occur, the results are reported as impact potential. Potential impacts are reported in kilograms of equivalent relative contribution (eq) of an emission commonly associated with that form of environmental impact (e.g. kg CO<sub>2</sub>eq).

The following list provides a description of environmental impact categories reported according to the TRACI 2.1 characterization scheme, the environmental impact model developed by the US EPA to quantify environmental impact risk associated with emissions to the environment in the United States. TRACI is the standard environmental impact reporting format for LCA in North America. Impacts associated with land use change and fresh water depletion are not included in TRACI 2.1. For more information on TRACI 2.1, reference Bare 2010, EPA 2012, and Guinée 2001. For further description of measurement of environmental impacts in LCA, see Simonen 2014.

#### Acidification Potential (AP)

kg SO<sub>2</sub>eq

A measure of emissions that cause acidifying effects to the environment. The acidification potential is a measure of a molecule's capacity to increase the hydrogen ion (H<sup>+</sup>) concentration in the presence of water, thus decreasing the pH value. Potential effects include fish mortality, forest decline, and the deterioration of building materials.

#### Eutrophication Potential (EP)

kg Neq

A measure of the impacts of excessively high levels of macronutrients, the most important of which are nitrogen (N) and phosphorus (P). Nutrient enrichment may cause an undesirable shift in species composition and elevated biomass production in both aquatic and terrestrial ecosystems. In aquatic ecosystems, increased biomass production may lead to depressed oxygen levels caused by the additional consumption of oxygen in biomass decomposition.

#### Global Warming Potential (GWP)

kg CO<sub>2</sub>eq

A measure of greenhouse gas emissions, such as carbon dioxide and methane. These emissions are causing an increase in the absorption of radiation emitted by the earth, increasing the natural greenhouse effect. This may, in turn, have adverse impacts on ecosystem health, human health, and material welfare.

#### Ozone Depletion Potential (ODP)

kg CFC-11eq

A measure of air emissions that contribute to the depletion of the stratospheric ozone layer. Depletion of the ozone leads to higher levels of UVB ultraviolet rays reaching the earth's surface with detrimental effects on humans and plants. As these impacts tend to be very small, ODP impacts can be difficult to calculate and are prone to a larger margin of error than the other impact categories.

#### Smog Formation Potential (SFP)

kg O<sub>3</sub>eq

A measure of ground level ozone, caused by various chemical reactions between nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and volatile organic compounds (VOCs) in sunlight. Human health effects can result in a variety of respiratory issues, including increasing symptoms of bronchitis, asthma, and emphysema. Permanent lung damage may result from prolonged exposure to ozone. Ecological impacts include damage to various ecosystems and crop damage.

#### Primary Energy Demand (PED)

MJ (lower heating value)

A measure of the total amount of primary energy extracted from the earth. PED tracks energy resource use, not the environmental impacts associated with the resource use. PED is expressed in energy demand from non-renewable resources and from renewable resources. Efficiencies in energy conversion (e.g. power, heat, steam, etc.) are taken into account when calculating this result.

#### Non-Renewable Energy Demand

MJ (lower heating value)

A measure of the energy extracted from non-renewable resources (e.g. petroleum, natural gas, etc.) contributing to the PED. Non-renewable resources are those that cannot be regenerated within a human time scale. Efficiencies in energy conversion (e.g. power, heat, steam, etc.) are taken into account when calculating this result.

#### Renewable Energy Demand

MJ (lower heating value)

A measure of the energy extracted from renewable resources (e.g. hydropower, wind energy, solar power, etc.) contributing to the PED. Efficiencies in energy conversion (e.g. power, heat, steam, etc.) are taken into account when calculating this result.



## LCI Data

### END-OF-LIFE [C2-C4]

A Life Cycle Inventory (LCI) is a compilation and quantification of inputs and outputs for the reference unit. The following LCI provides a summary of all energy, construction, transportation, and material inputs present in the study. Materials are listed in alphabetical order along with a list of all Revit families and Tally entries in which they occur, along with any notes and system boundaries accompanying their database entries. Each entry lists the detailed scope for the LCI data sources used from the GaBi LCI database and identifies the LCI data source.

For LCI data sourced from an Environmental Product Declaration (EPD), the product manufacturer, EPD identification number, and Program Operator are listed. Where the LCI source does not provide data for all life cycle stages, default North American average values are used. This is of particular importance for European EPD sources, as EPD data are generally only provided for the product stage, and North American average values are used for the remaining life cycle stages.

Where specific quantities are associated with a data entry, such as user inputs, energy values, or material mass, the quantity is listed on the same line as the title of the entry.

### TRANSPORTATION [A4]

Default transportation values are based on the three-digit material commodity code in the 2012 Commodity Flow Survey by the US Department of Transportation Bureau of Transportation Statistics and the US Department of Commerce where more specific industry-level transportation is not available.

#### Transportation by Barge

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by barge.

LCI Source:  
GLO: Average ship, 1500t payload capacity/ canal ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

#### Transportation by Container Ship

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by container ship.

LCI Source:  
GLO: Container ship, 27500 dwt payload capacity, ocean going ts (2017)  
US: Heavy fuel oil at refinery (0.3wt% S) ts (2014)

#### Transportation by Rail

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by cargo rail.

LCI Source:  
GLO: Rail transport cargo - Diesel, average train, gross tonne weight 1000t / 726t payload capacity ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

#### Transportation by Truck

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by diesel truck.

LCI Source:  
US: Truck - Trailer, basic enclosed / 45,000 lb payload - 8b ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

## LCI Data (continued)

### END-OF-LIFE [C2-C4]

Specific end-of-life scenarios are detailed for each entry based on the US construction and demolition waste treatment methods and rates in the 2016 WARM Model by the US Environmental Protection Agency except where otherwise specified. Heterogeneous assemblies are modeled using the appropriate methodologies for the component materials.

#### End-of-Life Landfill

##### Scope:

Materials for which no recycling or incineration rates are known, no recycling occurs within the US at a commercial scale, or which are unable to be recycled are landfilled. This includes glass, drywall, insulation, and plastics. The solids contents of coatings, sealants, and paints are assumed to go to landfill, while the solvents or water evaporate during installation. Where the landfill contains biodegradable material, the energy recovered from landfill gas utilization is reflected as a credit in Module D.

##### LCI Source:

US: Glass/inert on landfill ts (2017)  
US: Biodegradable waste on landfill, post-consumer ts (2017)  
US: Plastic waste on landfill, post-consumer ts (2017)

#### Concrete End-of-Life

##### Scope:

Concrete (or other masonry products) are recycled into aggregate or general fill material or they are landfilled. It is assumed that 55% of the concrete is recycled. Module D accounts for both the credit associated with off-setting the production aggregate and the burden of the grinding energy required for processing.

##### LCI Source:

US: Diesel mix at refinery ts (2014)  
GLO: Fork lifter (diesel consumption) ts (2016)  
EU - 28 Gravel 2/32 ts (2017)  
US: Glass/inert on landfill ts (2017)

#### Metals End-of-Life

##### Scope:

Metal products are modeled using the avoided burden approach. The recycling rate at end of life is used to determine how much secondary metal can be recovered after having subtracted any scrap input into manufacturing (net scrap). Net scrap results in an environmental credit in Module D for the corresponding share of the primary burden that can be allocated to the subsequent product system using secondary material as an input. If the value in Module D reflects an environmental burden, then the original product (A1-A3) contains more secondary material than is recovered.

##### LCI Source:

Aluminum - RNA: Primary Aluminum Ingot AA/ts (2010)  
Aluminum - RNA: Secondary Aluminum Ingot AA/ts (2010)  
Brass - GLO: Zinc mix ts (2012)  
Brass - GLO: Copper (99.99% cathode) ICA (2013)  
Brass - EU-28: Brass (CuZn20) ts (2017)  
Copper - DE: Recycling potential copper sheet ts (2016)  
Steel - GLO: Value of scrap worldsteel (2014)  
Zinc - GLO: Special high grade zinc IZA (2012)

#### Wood End-of-Life

##### Scope:

End of Life waste treatment methods and rates for wood are based on the 2014 Municipal Solid Waste and Construction Demolition Wood Waste Generation and Recovery in the United States report by Dovetail Partners, Inc. It is assumed that 65.5% of wood is sent to landfill, 17.5% to incineration, and 17.5% to recovery.

##### LCI Source:

US: Untreated wood in waste incineration plant ts (2017)  
US: Wood product (OSB, particle board) waste in waste incineration plant ts (2017)  
US: Wood products (OSB, particle board) on landfill, post-consumer ts (2017)  
US: Untreated wood on landfill, post-consumer ts (2017)  
RNA: Softwood lumber CORRIM (2011)

## LCI Data

### MODEL ELEMENTS

#### Revit Categories

Ceilings  
Curtainwall Mullions  
Curtainwall Panels  
Doors  
Floors  
Roofs  
Stairs and Railings  
Structure  
Walls  
Windows

#### 2019.2\_MESTRADO\_EDIFICAÇÃO CLT\_tentando conexões

Worksets  
Workset1

#### Phases

Construção  
Movimentação de terra  
Reforma  
Terreno Original

### PRODUCT [A1-A3]

Materials and components are listed in alphabetical order along with a list of all Revit families and Tally entries in which they occur. The masses given here refer to the quantity of each material used over the building's life-cycle, which includes both Product [A1-A3] and Use [B2-B5] stages.

Additional provided data describing scope boundaries for each life cycle stage may be useful for interpretation of the impacts associated with the specific material or component. Each material or component is listed with its service life, or period of time after installation it is expected to meet the service requirements prior to replacement or repair. This value is indicated in parentheses next to the mass of the material associated with the listed Revit family. Values for transportation distance or service life shown with an asterisk (\*) indicate user-defined changes to default values. Values for service life shown with a dagger (†) indicate materials identified by the modeler as existing or salvaged.

<b>Brick, generic</b>	<b>145,683.6 kg</b>
Used in the following Revit families:	
Bloco Cerâmico 14cm- EXTERNAS	49,962.2 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 14cm- INTERNO	50,491.4 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE	9,753.7 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO	35,476.3 kg (50 yrs)

Used in the following Tally entries:

Brick

Description:

Common extruded brick, excludes mortar.

Life Cycle Inventory:

100% Fired brick

Product Scope:

Cradle to gate  
excludes mortar  
anchors, ties, and metal accessories outside of scope (<1% mass)

Transportation Distance:

By truck: 20 km\*

End-of-Life Scope:

55% Recycled into coarse aggregate  
45% Landfilled (inert material)

Module D Scope:

Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy

LCI Source:

DE: Stoneware tiles, unglazed (EN15804 A1-A3) ts (2017)

<b>CLT (Cross laminated timber)</b>	<b>421,345.6 kg</b>
-------------------------------------	---------------------

Used in the following Revit families:

Escada	4,356.9 kg (50 yrs*)
L120 mm LSc- INTERIOR	83,966.4 kg (50 yrs*)
L140 mm LSc	103,909.8 kg (50 yrs*)
L140 mm LSc- COBERTURA	17,330.6 kg (50 yrs*)
L140 mm LSc- EXTERNAS	31,921.4 kg (50 yrs*)
L160 mm LSc- EXTERNAS	47,156.9 kg (50 yrs*)
L180 mm LSc- NÚCLEO ESTRUTURANTE	66,699.8 kg (50 yrs*)
L180 mm LSc- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERIOR	66,003.8 kg (50 yrs*)

Used in the following Tally entries:

Cross laminated timber (CLT)

Description:

Engineered wood panel made of several layers of kiln-dried lumber stacked in alternating directions, bonded with structural adhesives, and pressed to form a solid rectangular panel.

Life Cycle Inventory:

Produced by Glulam

Product Scope:

Cradle to gate

Transportation Distance:

By truck: 465 km\*

End-of-Life Scope:

14.5% Recovered

## LCI Data (continued)

22% Incinerated with energy recovery 63.5% Landfilled (wood product waste)			Precast concrete structural panel, hollow core	
Module D Scope: Recovered wood products credited as avoided burden.			Description: Common unfinished tempered steel rod suitable for structural reinforcement (rebar)	
LCI Source: RNA: Glue laminated timbers CORRIM (2011)			Life Cycle Inventory: 100% Steel rebar	
			Product Scope: Cradle to gate	
<b>Fasteners, stainless steel</b>	<b>1,170.0 kg</b>		Transportation Distance: By truck: 440 km*	
Used in the following Revit families: Pilar rectangular	1,170.0 kg (50 yrs*)		End-of-Life Scope: 70% Recovered 30% Landfilled (inert material)	
Used in the following Tally entries: Stainless Steel, Fasteners			Module D Scope: Product has a 16.4% scrap input while remainder is processed and credited as avoided burden.	
Description: Stainless steel part, appropriate for use as fasteners and specialized hardware (bolts, rails, clips, etc.). Data based on industry-wide EPDs for primary and secondary metal from the World Steel Association.			LCI Source: GLO: Steel rebar worldsteel (2014)	
Life Cycle Inventory: 100% Stainless steel				
Product Scope: Cradle to gate			<b>Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag</b>	<b>489,958.0 kg</b>
Transportation Distance: By truck: 440 km*			Used in the following Revit families:	
End-of-Life Scope: 98% Recovered 2% Landfilled (inert material)			15cm - Cerâmica 46x46cm	109,586.4 kg (50 yrs)
Module D Scope: Product has 58% scrap input while remainder is processed and credited as avoided burden			15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA	7,316.3 kg (50 yrs)
LCI Source: RER: Stainless steel Quarto plate (304) Eurofer (2010) GLO: Steel turning ts (2017) US: Electricity grid mix ts (2014) RER: Stainless steel flat product (304) - value of scrap Eurofer (2010)			Pilar rectangular	305,025.6 kg (50 yrs)
			viga	68,029.7 kg (50 yrs)
			Used in the following Tally entries: Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi Precast concrete structural panel, hollow core	
			Description: Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag. Mix design matches National Ready-Mix Concrete Association (NRMCA) industry-wide EPD.	
			Life Cycle Inventory: 14% Cement 6% Slag 7% Batch water 40% Coarse aggregate 33% Fine aggregate	
<b>Mortar type S</b>	<b>13,486.3 kg</b>		Product Scope: Cradle to gate, excludes mortar Anchors, ties, and metal accessories outside of scope (<1% mass)	
Used in the following Revit families: Bloco Cerâmico 14cm- EXTERNAS Bloco Cerâmico 14cm- INTERNO Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO	4,625.1 kg (50 yrs) 4,674.1 kg (50 yrs) 902.9 kg (50 yrs) 3,284.1 kg (50 yrs)		Transportation Distance: By truck: 50 km*	
Used in the following Tally entries: Brick			End-of-Life Scope: 55% Recycled into coarse aggregate 45% Landfilled (inert material)	
Description: Mortar Type S (medium strength mortar) for use with masonry walls and flooring.			Module D Scope: Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy	
Life Cycle Inventory: Dried mix: 78% sand 17% cement 4% calcium hydroxide 1% limestone (12% water evaporates on drying)			LCI Source: US: Portland cement PCA/ts (2014) DE: Pumice gravel (grain size 4/16) (EN15804 A1-A3) ts (2017) DE: Gravel (Grain size 2/32) (EN15804 A1-A3) ts (2017) DE: Fly ash (EN15804 A1-A3) ts (2017) DE: Slag-tap granulate (EN15804 A1-A3) ts (2017) DE: Expanded clay (EN15804 A1-A3) ts (2017) DE: Calcium nitrate ts (2017) DE: Sodium ligninsulfonate ts (2017) DE: Sodium naphthalene sulfonate [estimated] ts (2017) US: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%) ts (2017) US: Colophony (rosin, refined) from CN pine gum rosin ts (2017) US: Tap water from groundwater ts (2017) US: Electricity grid mix ts (2014) US: Natural gas mix ts (2014) US: Diesel mix at filling station (100% fossil) ts (2014) US: Liquefied Petroleum Gas (LPG) (70% propane 30% butane) ts (2014) US: Light fuel oil at refinery ts (2014)	
Product Scope: Cradle to gate				
Transportation Distance: By truck: 50 km*				
End-of-Life Scope: 55% Recycled into coarse aggregate 45% Landfilled (inert material)				
Module D Scope: Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy				
LCI Source: DE: Siliceous sand (grain size 0/2) ts (2017) DE: Cement (CEM I 32.5) (EN15804 A1-A3) ts (2017) DE: Gravel (Grain size 2/32) (EN15804 A1-A3) ts (2017) US: Tap water from groundwater ts (2017)				
<b>Steel, reinforcing rod</b>	<b>73,767.2 kg</b>			
Used in the following Revit families: 15cm - Cerâmica 46x46cm 15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA Pilar rectangular viga	6,395.6 kg (50 yrs) 427.0 kg (50 yrs) 55,610.3 kg (50 yrs) 11,334.3 kg (50 yrs)			
Used in the following Tally entries: Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi				

## **ANEXO 2 – RESULTADOS SIMULAÇÃO ACV- TALLY (CONCRETO ARMADO E BLOCO CERÂMICO)**

### **MODELO EM BLOCO DE CONCRETO**

Full building summary

06/01/2020



## Report Summary

### Created with Tally

Non-commercial Version 2018.09.27.01

### Goal and Scope of Assessment

ACV de uma edificação de oito pavimentos em BLOCO DE CONCRETO

**Author** prof\_brunamidel  
**Company** UFPR  
**Date** 06/01/2020  
  
**Project** MODELO EM BLOCO DE CONCRETO  
**Location** CENTRO POLITÉCNICO  
**Gross Area** 2610,10 m<sup>2</sup>  
**Building Life** 50

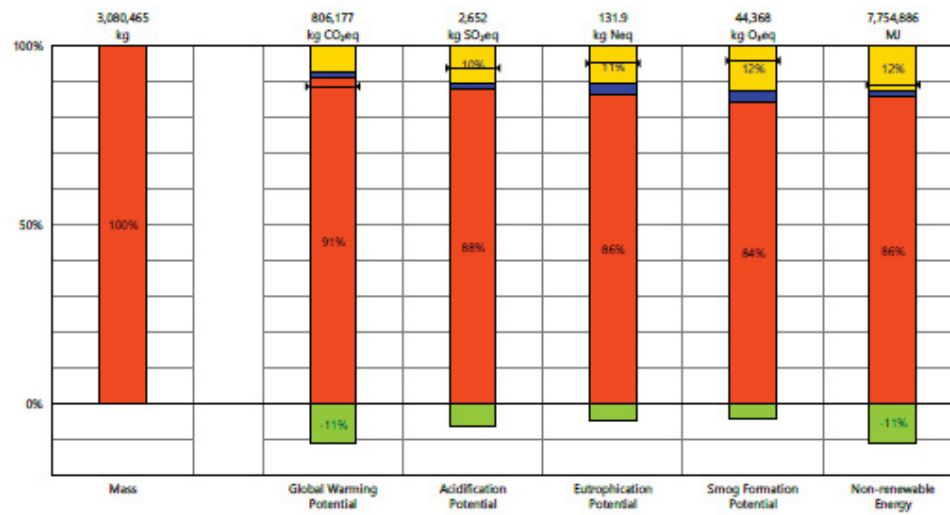
**Boundaries** Cradle to grave, inclusive of biogenic carbon; see appendix for a full list of materials and processes

**On-site Construction [A5]** Not included

**Operational Energy [B6]** Not included

	Product Stage [A1-A3]	Construction Stage [A4]	Use Stage [B2-B5]	End of Life Stage [C2-C4]	Module D [D]
<b>Environmental Impact Totals</b>					
Global Warming (kg CO <sub>2</sub> eq)	736,217	10,128	0	59,832	-90,171
Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq)	2,329	46,93	0	276.5	-162
Eutrophication (kg Neq)	114.0	3,821	0	14.02	-6.31
Smog Formation (kg O <sub>3</sub> eq)	37,318	1,551	0	5,499	-1,796
Ozone Depletion (kg CFC-11eq)	-0,001514	3,469E-010	0	1.100E-008	6,561E-004
Primary Energy (MJ)	7,117,781	147,280	0	1,024,402	-787,351
Non-renewable Energy (MJ)	6,653,268	143,756	0	957,863	-837,540
Renewable Energy (MJ)	473,865	3,561	0	67,683	49,897
<b>Environmental Impacts / Area</b>					
Global Warming (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	282.1	3.880	0	22.92	-34.5
Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	0,8923	0,01798	0	0,1059	-0,06209
Eutrophication (kg Neq/m <sup>2</sup> )	0,04369	0,001464	0	0,005372	-0,002416
Smog Formation (kg O <sub>3</sub> eq/m <sup>2</sup> )	14.30	0,5941	0	2.107	-0,6879
Ozone Depletion (kg CFC-11eq/m <sup>2</sup> )	-5.802E-007	1.329E-013	0	4.214E-012	2.514E-007
Primary Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	2,727	56.43	0	392.5	-302
Non-renewable Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	2,549	55.08	0	367.0	-321
Renewable Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	181.6	1.364	0	25.93	19.12

## Results per Life Cycle Stage

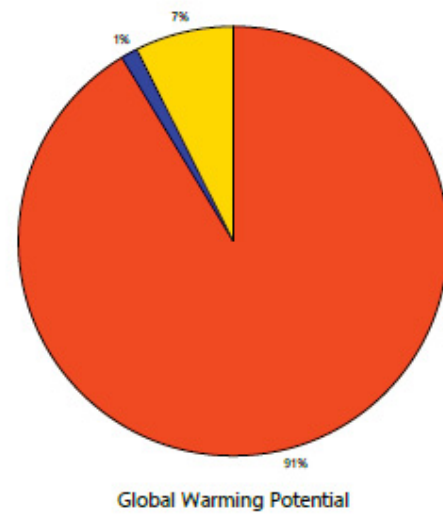


### Legend

Net value (impacts + credits)

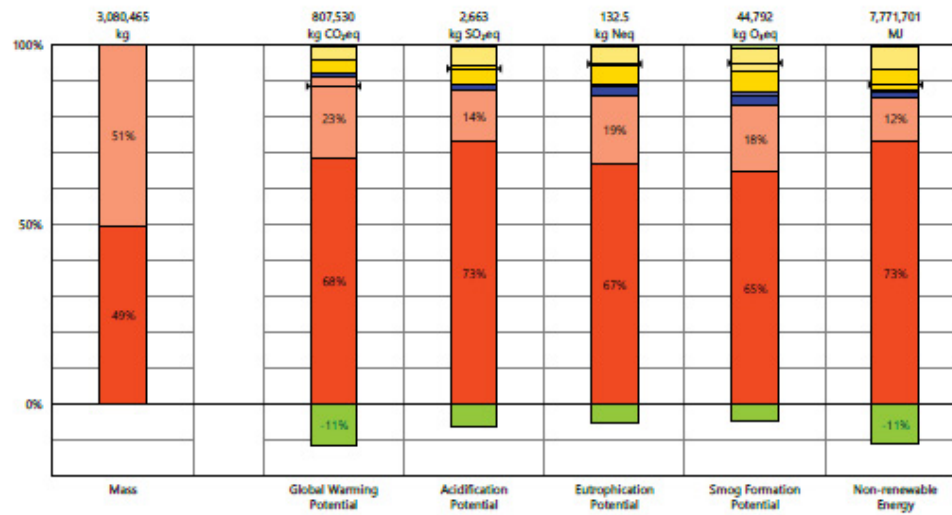
#### Life Cycle Stages

- Product [A1-A3]
- Transportation [A4]
- Maintenance and Replacement [B2-B5]
- End of Life [C2-C4]
- Module D [D]





### Results per Life Cycle Stage, itemized by Division



### Legend

Net value (impacts + credits)

Product [A1-A3]

03 - Concrete

04 - Masonry

Transportation [A4]

03 - Concrete

04 - Masonry

Maintenance and Replacement [B2-B5]

03 - Concrete

04 - Masonry

End of Life [C2-C4]

03 - Concrete

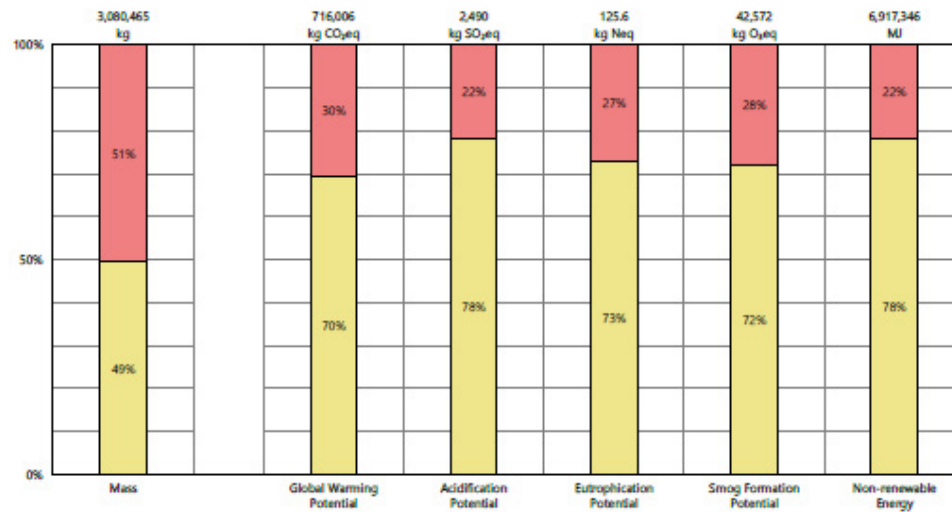
04 - Masonry

Module D [D]

03 - Concrete

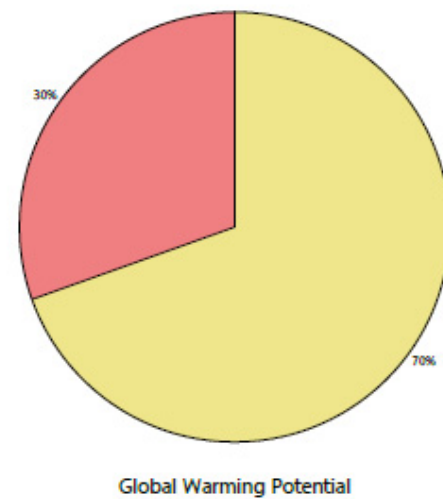
04 - Masonry

### Results per Division

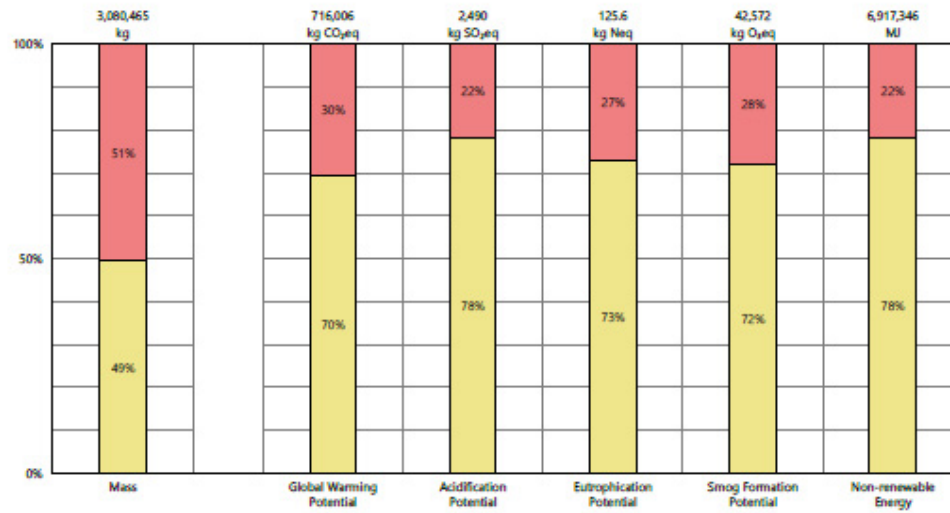


### Legend

Divisions  
 03 - Concrete  
 04 - Masonry



Results per Division, itemized by Tally Entry



Legend

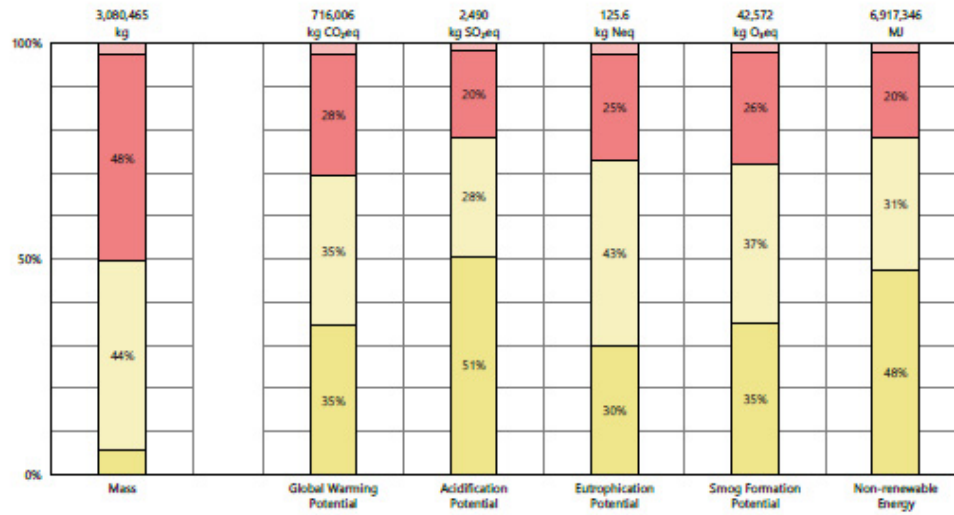
03 - Concrete

Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi

04 - Masonry

Hollow-core CMU

Results per Division, itemized by Material



Legend

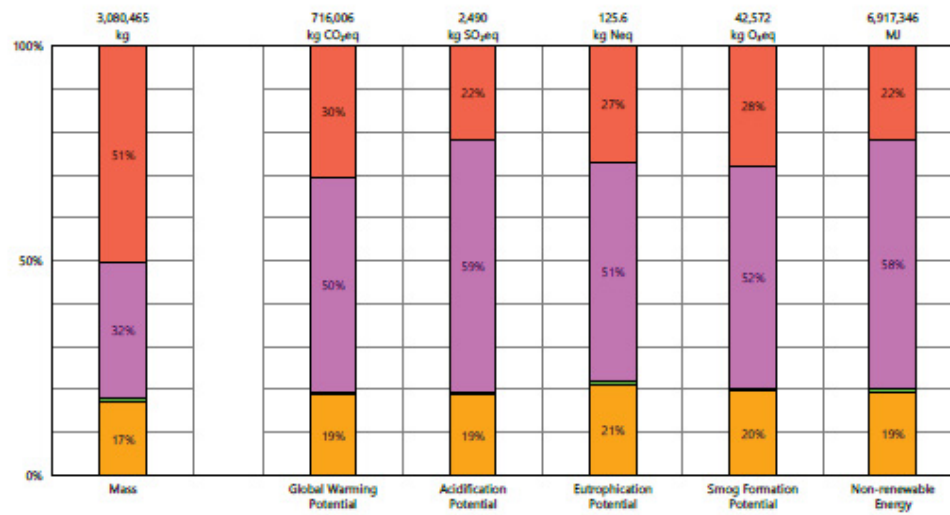
03 - Concrete

- Steel, reinforcing rod
- Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag

04 - Masonry

- Concrete masonry unit (CMU), hollow-core
- Mortar type S

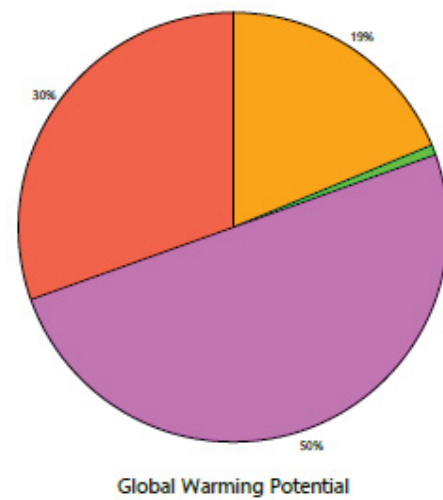
### Results per Revit Category



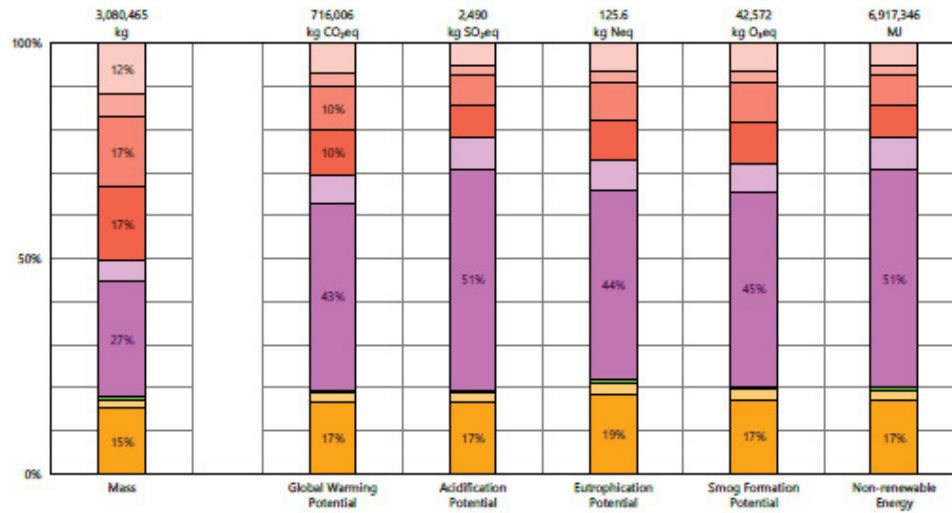
### Legend

#### Revit Categories

- Floors
- Stairs and Railings
- Structure
- Walls



### Results per Revit Category, itemized by Family



### Legend

#### Floors

- 15cm - Cerâmica 46x46cm
- 15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA

#### Stairs and Railings

- Escada

#### Structure

- Pilar retangular
- viga

#### Walls

- Bloco Concreto 14cm- EXTERNAS
- Bloco Concreto 14cm- INTERNO
- Bloco Concreto 14cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE
- Bloco Concreto 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO

## LCI Data

### END-OF-LIFE [C2-C4]

A Life Cycle Inventory (LCI) is a compilation and quantification of inputs and outputs for the reference unit. The following LCI provides a summary of all energy, construction, transportation, and material inputs present in the study. Materials are listed in alphabetical order along with a list of all Revit families and Tally entries in which they occur, along with any notes and system boundaries accompanying their database entries. Each entry lists the detailed scope for the LCI data sources used from the GaBi LCI database and identifies the LCI data source.

For LCI data sourced from an Environmental Product Declaration (EPD), the product manufacturer, EPD identification number, and Program Operator are listed. Where the LCI source does not provide data for all life cycle stages, default North American average values are used. This is of particular importance for European EPD sources, as EPD data are generally only provided for the product stage, and North American average values are used for the remaining life cycle stages.

Where specific quantities are associated with a data entry, such as user inputs, energy values, or material mass, the quantity is listed on the same line as the title of the entry.

### TRANSPORTATION [A4]

Default transportation values are based on the three-digit material commodity code in the 2012 Commodity Flow Survey by the US Department of Transportation Bureau of Transportation Statistics and the US Department of Commerce where more specific industry-level transportation is not available.

#### Transportation by Barge

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by barge.

LCI Source:  
GLO: Average ship, 1500t payload capacity/ canal ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

#### Transportation by Container Ship

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by container ship.

LCI Source:  
GLO: Container ship, 27500 dwt payload capacity, ocean going ts (2017)  
US: Heavy fuel oil at refinery (0.3wt% S) ts (2014)

#### Transportation by Rail

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by cargo rail.

LCI Source:  
GLO: Rail transport cargo - Diesel, average train, gross tonne weight 1000t / 726t payload capacity ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

#### Transportation by Truck

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by diesel truck.

LCI Source:  
US: Truck - Trailer, basic enclosed / 45,000 lb payload - 8b ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)



## LCI Data (continued)

### END-OF-LIFE [C2-C4]

Specific end-of-life scenarios are detailed for each entry based on the US construction and demolition waste treatment methods and rates in the 2016 WARM Model by the US Environmental Protection Agency except where otherwise specified. Heterogeneous assemblies are modeled using the appropriate methodologies for the component materials.

#### End-of-Life Landfill

##### Scope:

Materials for which no recycling or incineration rates are known, no recycling occurs within the US at a commercial scale, or which are unable to be recycled are landfilled. This includes glass, drywall, insulation, and plastics. The solids contents of coatings, sealants, and paints are assumed to go to landfill, while the solvents or water evaporate during installation. Where the landfill contains biodegradable material, the energy recovered from landfill gas utilization is reflected as a credit in Module D.

##### LCI Source:

US: Glass/inert on landfill ts (2017)  
US: Biodegradable waste on landfill, post-consumer ts (2017)  
US: Plastic waste on landfill, post-consumer ts (2017)

#### Concrete End-of-Life

##### Scope:

Concrete (or other masonry products) are recycled into aggregate or general fill material or they are landfilled. It is assumed that 55% of the concrete is recycled. Module D accounts for both the credit associated with off-setting the production aggregate and the burden of the grinding energy required for processing.

##### LCI Source:

US: Diesel mix at refinery ts (2014)  
GLO: Fork lifter (diesel consumption) ts (2016)  
EU - 28 Gravel 2/32 ts (2017)  
US: Glass/inert on landfill ts (2017)

#### Metals End-of-Life

##### Scope:

Metal products are modeled using the avoided burden approach. The recycling rate at end of life is used to determine how much secondary metal can be recovered after having subtracted any scrap input into manufacturing (net scrap). Net scrap results in an environmental credit in Module D for the corresponding share of the primary burden that can be allocated to the subsequent product system using secondary material as an input. If the value in Module D reflects an environmental burden, then the original product (A1-A3) contains more secondary material than is recovered.

##### LCI Source:

Aluminum - RNA: Primary Aluminum Ingot AA/ts (2010)  
Aluminum - RNA: Secondary Aluminum Ingot AA/ts (2010)  
Brass - GLO: Zinc mix ts (2012)  
Brass - GLO: Copper (99.99% cathode) ICA (2013)  
Brass - EU-28: Brass (CuZn20) ts (2017)  
Copper - DE: Recycling potential copper sheet ts (2016)  
Steel - GLO: Value of scrap worldsteel (2014)  
Zinc - GLO: Special high grade zinc IZA (2012)

#### Wood End-of-Life

##### Scope:

End of Life waste treatment methods and rates for wood are based on the 2014 Municipal Solid Waste and Construction Demolition Wood Waste Generation and Recovery in the United States report by Dovetail Partners, Inc. It is assumed that 65.5% of wood is sent to landfill, 17.5% to incineration, and 17.5% to recovery.

##### LCI Source:

US: Untreated wood in waste incineration plant ts (2017)  
US: Wood product (OSB, particle board) waste in waste incineration plant ts (2017)  
US: Wood products (OSB, particle board) on landfill, post-consumer ts (2017)  
US: Untreated wood on landfill, post-consumer ts (2017)  
RNA: Softwood lumber CORRIM (2011)

## LCI Data

### MODEL ELEMENTS

#### Revit Categories

Ceilings  
Curtainwall Mullions  
Curtainwall Panels  
Doors  
Floors  
Roofs  
Stairs and Railings  
Structure  
Walls  
Windows

#### 2019\_2\_MESTRADO\_EDIFICAÇÃO B.C

Worksets  
Workset1

#### Phases

Construção  
Movimentação de terra  
Reforma  
Terreno Original

### PRODUCT [A1-A3]

Materials and components are listed in alphabetical order along with a list of all Revit families and Tally entries in which they occur. The masses given here refer to the quantity of each material used over the building's life-cycle, which includes both Product [A1-A3] and Use [B2-B5] stages.

Additional provided data describing scope boundaries for each life cycle stage may be useful for interpretation of the impacts associated with the specific material or component. Each material or component is listed with its service life, or period of time after installation it is expected to meet the service requirements prior to replacement or repair. This value is indicated in parentheses next to the mass of the material associated with the listed Revit family. Values for transportation distance or service life shown with an asterisk (\*) indicate user-defined changes to default values. Values for service life shown with a dagger (†) indicate materials identified by the modeler as existing or salvaged.

#### Concrete masonry unit (CMU), hollow-core 1,485,209.6 kg

Used in the following Revit families:

Bloco Concreto 14cm- EXTERNAS	502,673.9 kg (50 yrs*)
Bloco Concreto 14cm- INTERNO	488,678.2 kg (50 yrs*)
Bloco Concreto 14cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE	150,502.3 kg (50 yrs*)
Bloco Concreto 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO	343,355.2 kg (50 yrs*)

Used in the following Tally entries:

Hollow-core CMU

Description:

Hollow-Core Concrete Masonry Unit (CMU), excludes grout and mortar

Life Cycle Inventory:

100% Concrete masonry units

Product Scope:

Cradle to gate, excludes mortar

Anchors, ties, and metal accessories outside of scope (<1% mass)

Transportation Distance:

By truck: 25 km\*

End-of-Life Scope:

55% Recycled into coarse aggregate

45% Landfilled (inert material)

Module D Scope:

Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy

LCI Source:

DE: Concrete bricks (EN15804 A1-A3) ts (2017)

#### Mortar type S 71,758.5 kg

Used in the following Revit families:

Bloco Concreto 14cm- EXTERNAS	24,286.9 kg (50 yrs)
Bloco Concreto 14cm- INTERNO	23,610.7 kg (50 yrs)
Bloco Concreto 14cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE	7,271.6 kg (50 yrs)
Bloco Concreto 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO	16,589.3 kg (50 yrs)

Used in the following Tally entries:

Hollow-core CMU

Description:

Mortar Type S (medium strength mortar) for use with masonry walls and flooring.

Life Cycle Inventory:

Dried mix: 78% sand

17% cement

4% calcium hydroxide

1% limestone (12% water evaporates on drying)

Product Scope:

Cradle to gate

Transportation Distance:

By truck: 50 km\*

End-of-Life Scope:

55% Recycled into coarse aggregate

45% Landfilled (inert material)

Module D Scope:

Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy

# MODELO EM BLOCO DE CONCRETO

06/01/2020

## Full building summary

### LCI Data (continued)

Source:		US: Natural gas mix ts (2014)
DE Siliceous sand (grain size 0/2) ts (2017)		US: Diesel mix at filling station (100% fossil) ts (2014)
DE Cement (CEM I 32.5) (EN15804 A1-A3) ts (2017)		US: Liquefied Petroleum Gas (LPG) (70% propane 30% butane) ts (2014)
DE Gravel (Grain size 2/32) (EN15804 A1-A3) ts (2017)		US: Light fuel oil at refinery ts (2014)
US: Tap water from groundwater ts (2017)		
<b>Steel, reinforcing rod</b>	<b>175,892.6 kg</b>	
Used in the following Revit families:		
15cm - Cerâmica 46x46cm	25,874.0 kg (50 yrs)	
15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA	3,390.9 kg (50 yrs)	
Escada	1,184.4 kg (50 yrs)	
Pilar retangular	128,233.4 kg (50 yrs)	
viga	17,209.9 kg (50 yrs)	
Used in the following Tally entries:		
Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi		
Description:		
Common unfinished tempered steel rod suitable for structural reinforcement (rebar)		
Life Cycle Inventory:		
100% Steel rebar		
Product Scope:		
Cradle to gate		
Transportation Distance:		
By truck: 440 km*		
End-of-Life Scope:		
70% Recovered		
30% Landfilled (inert material)		
Module D Scope:		
Product has a 16.4% scrap input while remainder is processed and credited as avoided burden.		
LCI Source:		
GLO: Steel rebar worldsteel (2014)		
<b>Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag</b>	<b>1,347,604.8 kg</b>	
Used in the following Revit families:		
15cm - Cerâmica 46x46cm	443,342.0 kg (50 yrs)	
15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA	58,102.5 kg (50 yrs)	
Escada	20,293.8 kg (50 yrs)	
Pilar retangular	703,367.5 kg (50 yrs)	
viga	122,499.0 kg (50 yrs)	
Used in the following Tally entries:		
Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi		
Description:		
Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag. Mix design matches National Ready-Mix Concrete Association (NRMCA) Industry-wide EPD.		
Life Cycle Inventory:		
14% Cement		
6% Slag		
7% Batch water		
40% Coarse aggregate		
33% Fine aggregate		
Product Scope:		
Cradle to gate, excludes mortar		
Anchors, ties, and metal accessories outside of scope (<1% mass)		
Transportation Distance:		
By truck: 50 km*		
End-of-Life Scope:		
55% Recycled into coarse aggregate		
45% Landfilled (inert material)		
Module D Scope:		
Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy		
LCI Source:		
US: Portland cement PCA/ts (2014)		
DE: Pumice gravel (grain size 4/16) (EN15804 A1-A3) ts (2017)		
DE: Gravel (Grain size 2/32) (EN15804 A1-A3) ts (2017)		
DE: Fly ash (EN15804 A1-A3) ts (2017)		
DE: Slag-tap granulate (EN15804 A1-A3) ts (2017)		
DE: Expanded clay (EN15804 A1-A3) ts (2017)		
DE: Calcium nitrate ts (2017)		
DE: Sodium ligninsulfonate ts (2017)		
DE: Sodium naphthalene sulfonate [estimated] ts (2017)		
US: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%) ts (2017)		
US: Colophony (rosin, refined) from CN pine gum rosin ts (2017)		
US: Tap water from groundwater ts (2017)		
US: Electricity grid mix ts (2014)		

## ANEXO 3 – RESULTADOS SIMULAÇÃO ACV- TALLY (BLOCO DE CONCRETO)

### MODELO EM CONCRETO E BLOCO CERÂMICO

Full building summary

04/01/2020

## Report Summary

**Created with Tally**  
Non-commercial Version 2018.09.27.01

**Goal and Scope of Assessment**  
ACV de uma edificação de oito pavimentos em CONCRETO ARMADO IN LOCO E BLOCO CERÂMICO.

**Author** prof\_brunamidel  
**Company** UFPR  
**Date** 04/01/2020  
  
**Project** MODELO EM CONCRETO E BLOCO CERÂMICO  
**Location** CENTRO POLITÉCNICO UFPR  
**Gross Area** 2610,10 m<sup>2</sup>  
**Building Life** 50

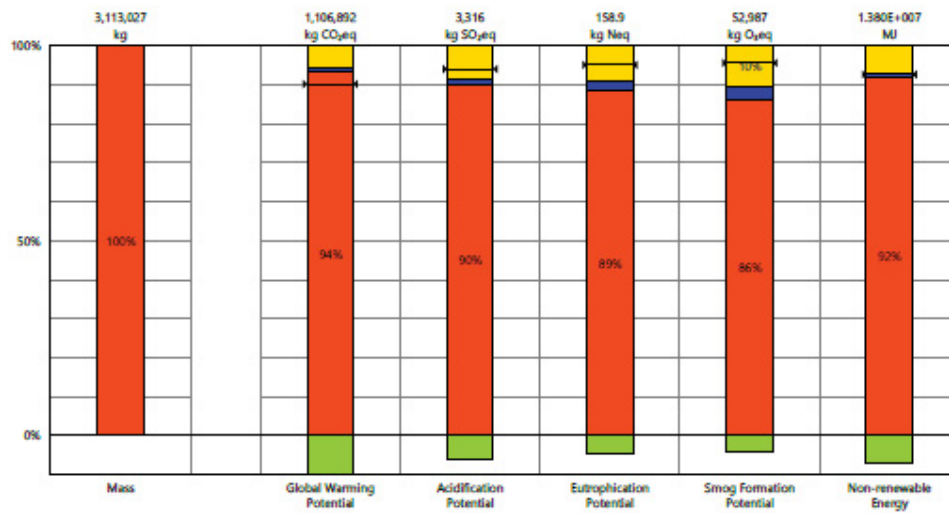
**Boundaries** Cradle to grave, inclusive of biogenic carbon; see appendix for a full list of materials and processes

**On-site Construction [A5]** Not included

**Operational Energy [B6]** Not included

Environmental Impact Totals	Product Stage [A1-A3]	Construction Stage [A4]	Use Stage [B2-B5]	End of Life Stage [C2-C4]	Module D [D]
Global Warming (kg CO <sub>2</sub> eq)	1,035,669	10,976	0	60,247	-108,565
Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq)	2,987	50,86	0	278.4	-198
Eutrophication (kg Neq)	140.6	4.141	0	14.12	-7.77
Smog Formation (kg O <sub>3</sub> eq)	45,770	1,681	0	5,537	-2,309
Ozone Depletion (kg CFC-11eq)	-0,001815	3.759E-010	0	1.108E-008	7.862E-004
Primary Energy (MJ)	1.340E+007	159,618	0	1,031,497	-947,904
Non-renewable Energy (MJ)	1.268E+007	155,799	0	964,486	-1,009,967
Renewable Energy (MJ)	728,606	3,860	0	68,151	61,736
<b>Environmental Impacts / Area</b>					
Global Warming (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	396.8	4.205	0	23.08	-41.6
Acidification (kg SO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	1.144	0,01949	0	0,1067	-0,07587
Eutrophication (kg Neq/m <sup>2</sup> )	0,05387	0,001587	0	0,005409	-0,002978
Smog Formation (kg O <sub>3</sub> eq/m <sup>2</sup> )	17.54	0,6439	0	2.121	-0,8847
Ozone Depletion (kg CFC-11eq/m <sup>2</sup> )	-6.953E-007	1.440E-013	0	4.244E-012	3.012E-007
Primary Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	5,133	61.15	0	395.2	-363
Non-renewable Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	4,857	59.69	0	369.5	-387
Renewable Energy (MJ/m <sup>2</sup> )	279.1	1.479	0	26.11	23.65

### Results per Life Cycle Stage

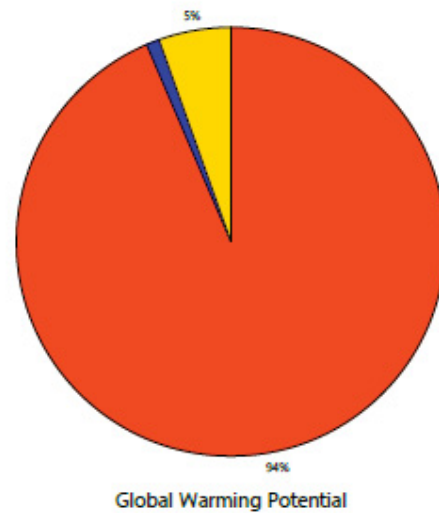


### Legend

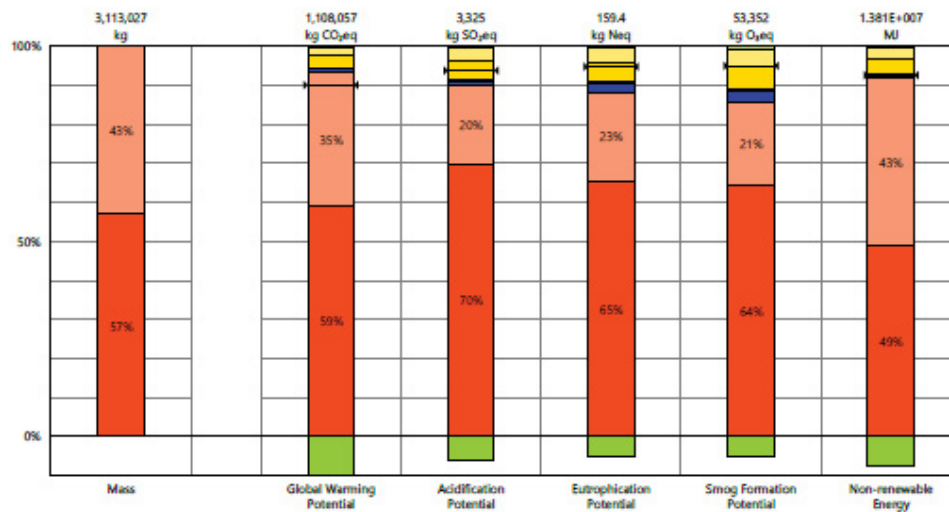
Net value (impacts + credits)

#### Life Cycle Stages

- Product [A1-A3]
- Transportation [A4]
- Maintenance and Replacement [B2-B5]
- End of Life [C2-C4]
- Module D [D]



### Results per Life Cycle Stage, itemized by Division



#### Legend

Net value (impacts + credits)

Product [A1-A3]

03 - Concrete

04 - Masonry

Transportation [A4]

03 - Concrete

04 - Masonry

Maintenance and Replacement [B2-B5]

03 - Concrete

04 - Masonry

End of Life [C2-C4]

03 - Concrete

04 - Masonry

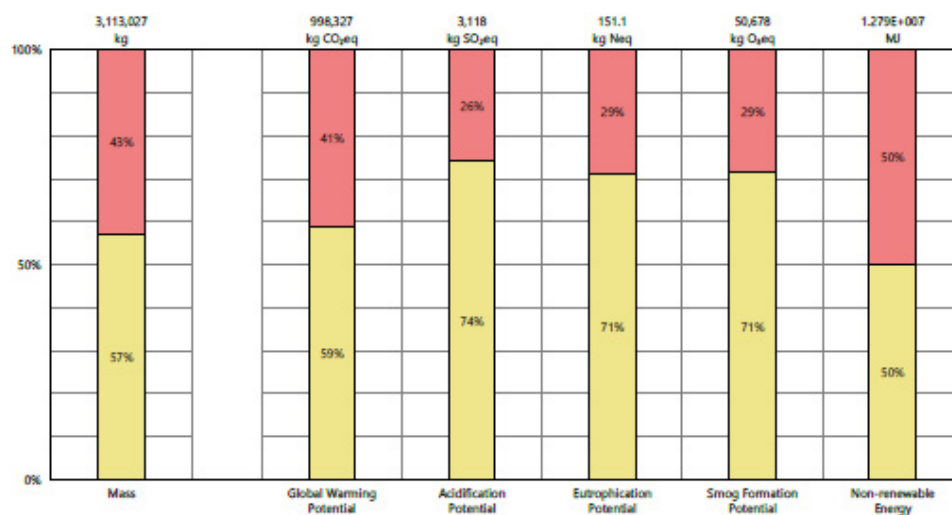
Module D [D]

03 - Concrete

04 - Masonry

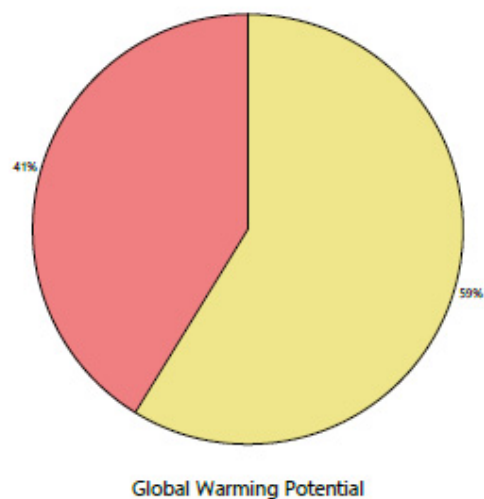


### Results per Division

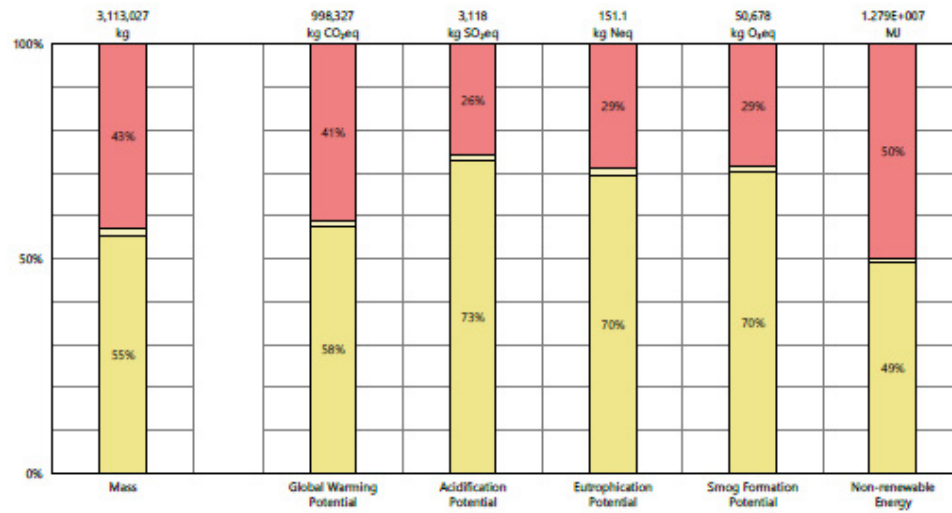


### Legend

Divisions  
 03 - Concrete  
 04 - Masonry



### Results per Division, itemized by Tally Entry



### Legend

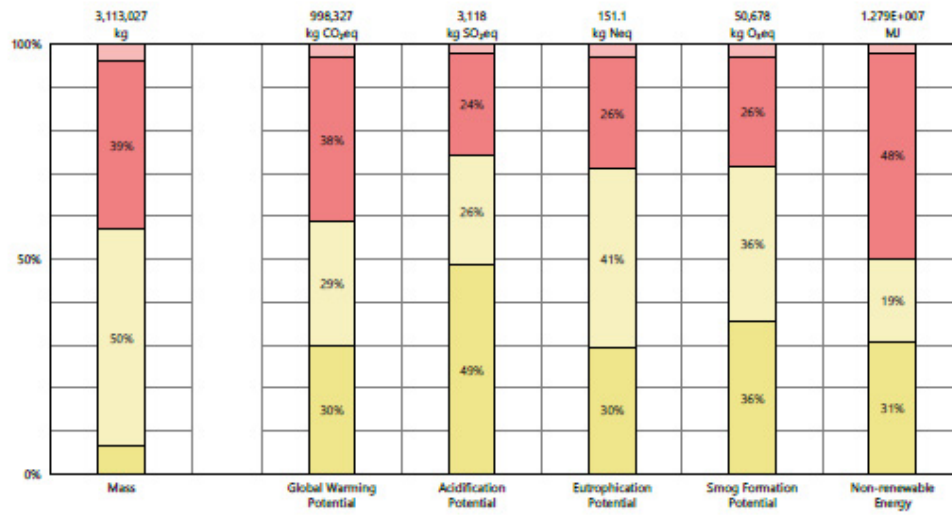
#### 03 - Concrete

- Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi
- Precast concrete structural panel, hollow core

#### 04 - Masonry

- Brick

Results per Division, itemized by Material



Legend

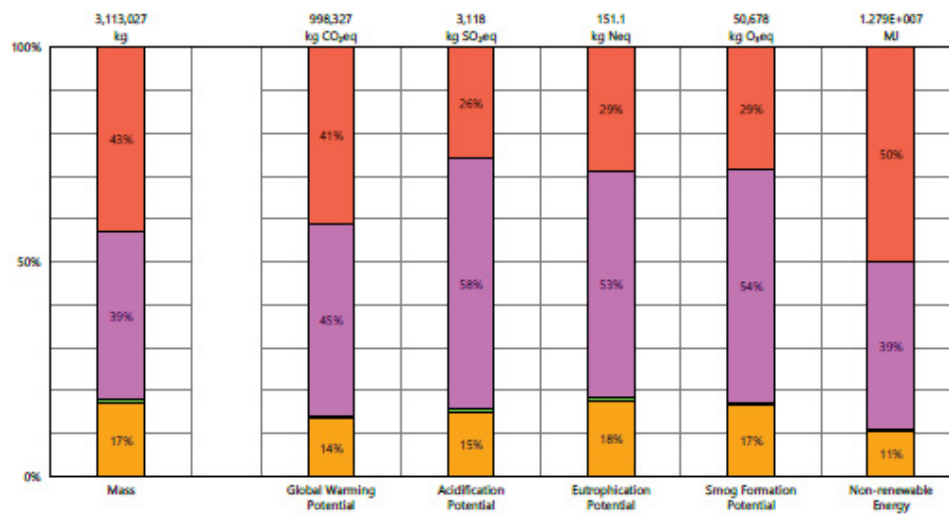
03 - Concrete

- Steel, reinforcing rod
- Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag

04 - Masonry

- Brick, generic
- Mortar type S

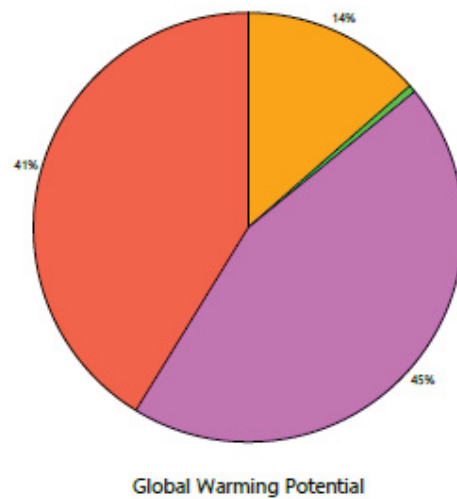
### Results per Revit Category



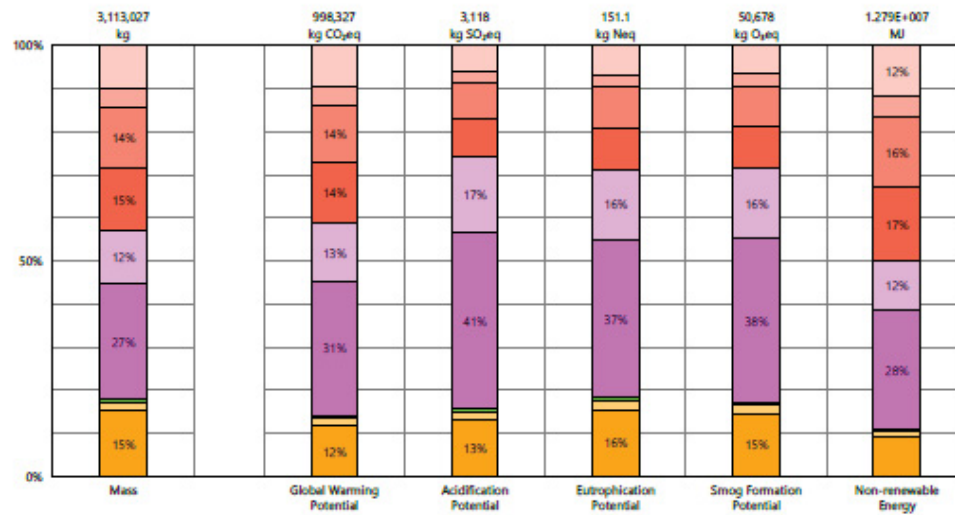
### Legend

#### Revit Categories

- Floors
- Stairs and Railings
- Structure
- Walls



### Results per Revit Category, itemized by Family



### Legend

#### Floors

- 15cm - Cerâmica 46x46cm
- 15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA

#### Stairs and Railings

- Escada

#### Structure

- Pilar retangular
- viga

#### Walls

- Bloco Cerâmico 14cm- EXTERNAS
- Bloco Cerâmico 14cm- INTERNO
- Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE
- Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO

## LCI Data

### END-OF-LIFE [C2-C4]

A Life Cycle Inventory (LCI) is a compilation and quantification of inputs and outputs for the reference unit. The following LCI provides a summary of all energy, construction, transportation, and material inputs present in the study. Materials are listed in alphabetical order along with a list of all Revit families and Tally entries in which they occur, along with any notes and system boundaries accompanying their database entries. Each entry lists the detailed scope for the LCI data sources used from the GaBi LCI database and identifies the LCI data source.

For LCI data sourced from an Environmental Product Declaration (EPD), the product manufacturer, EPD identification number, and Program Operator are listed. Where the LCI source does not provide data for all life cycle stages, default North American average values are used. This is of particular importance for European EPD sources, as EPD data are generally only provided for the product stage, and North American average values are used for the remaining life cycle stages.

Where specific quantities are associated with a data entry, such as user inputs, energy values, or material mass, the quantity is listed on the same line as the title of the entry.

### TRANSPORTATION [A4]

Default transportation values are based on the three-digit material commodity code in the 2012 Commodity Flow Survey by the US Department of Transportation Bureau of Transportation Statistics and the US Department of Commerce where more specific industry-level transportation is not available.

#### Transportation by Barge

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by barge.

LCI Source:  
GLO: Average ship, 1500t payload capacity/ canal ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

#### Transportation by Container Ship

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by container ship.

LCI Source:  
GLO: Container ship, 27500 dwt payload capacity, ocean going ts (2017)  
US: Heavy fuel oil at refinery (0.3wt% S) ts (2014)

#### Transportation by Rail

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by cargo rail.

LCI Source:  
GLO: Rail transport cargo - Diesel, average train, gross tonne weight 1000t / 726t payload capacity ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

#### Transportation by Truck

Scope:  
The data set represents the transportation of 1 kg of material from the manufacturer location to the building site by diesel truck.

LCI Source:  
US: Truck - Trailer, basic enclosed / 45,000 lb payload - 8b ts (2017)  
US: Diesel mix at filling station ts (2014)

## LCI Data (continued)

### END-OF-LIFE [C2-C4]

Specific end-of-life scenarios are detailed for each entry based on the US construction and demolition waste treatment methods and rates in the 2016 WARM Model by the US Environmental Protection Agency except where otherwise specified. Heterogeneous assemblies are modeled using the appropriate methodologies for the component materials.

#### End-of-Life Landfill

##### Scope:

Materials for which no recycling or incineration rates are known, no recycling occurs within the US at a commercial scale, or which are unable to be recycled are landfilled. This includes glass, drywall, insulation, and plastics. The solids contents of coatings, sealants, and paints are assumed to go to landfill, while the solvents or water evaporate during installation. Where the landfill contains biodegradable material, the energy recovered from landfill gas utilization is reflected as a credit in Module D.

##### LCI Source:

US: Glass/inert on landfill ts (2017)  
US: Biodegradable waste on landfill, post-consumer ts (2017)  
US: Plastic waste on landfill, post-consumer ts (2017)

#### Concrete End-of-Life

##### Scope:

Concrete (or other masonry products) are recycled into aggregate or general fill material or they are landfilled. It is assumed that 55% of the concrete is recycled. Module D accounts for both the credit associated with off-setting the production aggregate and the burden of the grinding energy required for processing.

##### LCI Source:

US: Diesel mix at refinery ts (2014)  
GLO: Fork lifter (diesel consumption) ts (2016)  
EU - 28 Gravel 2/32 ts (2017)  
US: Glass/inert on landfill ts (2017)

#### Metals End-of-Life

##### Scope:

Metal products are modeled using the avoided burden approach. The recycling rate at end of life is used to determine how much secondary metal can be recovered after having subtracted any scrap input into manufacturing (net scrap). Net scrap results in an environmental credit in Module D for the corresponding share of the primary burden that can be allocated to the subsequent product system using secondary material as an input. If the value in Module D reflects an environmental burden, then the original product (A1-A3) contains more secondary material than is recovered.

##### LCI Source:

Aluminum - RNA: Primary Aluminum Ingot AA/ts (2010)  
Aluminum - RNA: Secondary Aluminum Ingot AA/ts (2010)  
Brass - GLO: Zinc mix ts (2012)  
Brass - GLO: Copper (99.99% cathode) ICA (2013)  
Brass - EU-28: Brass (CuZn20) ts (2017)  
Copper - DE: Recycling potential copper sheet ts (2016)  
Steel - GLO: Value of scrap worldsteel (2014)  
Zinc - GLO: Special high grade zinc IZA (2012)

#### Wood End-of-Life

##### Scope:

End of Life waste treatment methods and rates for wood are based on the 2014 Municipal Solid Waste and Construction Demolition Wood Waste Generation and Recovery in the United States report by Dovetail Partners, Inc. It is assumed that 65.5% of wood is sent to landfill, 17.5% to incineration, and 17.5% to recovery.

##### LCI Source:

US: Untreated wood in waste incineration plant ts (2017)  
US: Wood product (OSB, particle board) waste in waste incineration plant ts (2017)  
US: Wood products (OSB, particle board) on landfill, post-consumer ts (2017)  
US: Untreated wood on landfill, post-consumer ts (2017)  
RNA: Softwood lumber CORRIM (2011)



## LCI Data

### MODEL ELEMENTS

#### Revit Categories

Ceilings  
Curtainwall Mullions  
Curtainwall Panels  
Doors  
Floors  
Roofs  
Stairs and Railings  
Structure  
Walls  
Windows

#### 2019\_2\_MESTRADO\_EDIFICAÇÃO C.A

Worksets  
Worksheet1

#### Phases

Construção  
Movimentação de terra  
Reforma  
Terreno Original

### PRODUCT [A1-A3]

Materials and components are listed in alphabetical order along with a list of all Revit families and Tally entries in which they occur. The masses given here refer to the quantity of each material used over the building's life-cycle, which includes both Product [A1-A3] and Use [B2-B5] stages.

Additional provided data describing scope boundaries for each life cycle stage may be useful for interpretation of the impacts associated with the specific material or component. Each material or component is listed with its service life, or period of time after installation it is expected to meet the service requirements prior to replacement or repair. This value is indicated in parentheses next to the mass of the material associated with the listed Revit family. Values for transportation distance or service life shown with an asterisk (\*) indicate user-defined changes to default values. Values for service life shown with a dagger (†) indicate materials identified by the modeler as existing or salvaged.

#### Brick, generic 1,227,643.5 kg

Used in the following Revit families:

Bloco Cerâmico 14cm- EXTERNAS	415,499.8 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 14cm- INTERNO	403,931.3 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE	124,402.1 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO	283,810.3 kg (50 yrs)

Used in the following Tally entries:

Brick

Description:

Common extruded brick, excludes mortar.

Life Cycle Inventory:

100% Fired brick

Product Scope:

Cradle to gate  
excludes mortar  
anchors, ties, and metal accessories outside of scope (<1% mass)

Transportation Distance:

By truck: 20 km\*

End-of-Life Scope:

55% Recycled into coarse aggregate  
45% Landfilled (inert material)

Module D Scope:

Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy

LCI Source:

DE: Stoneware tiles, unglazed (EN15804 A1-A3) ts (2017)

#### Mortar type S 113,646.0 kg

Used in the following Revit families:

Bloco Cerâmico 14cm- EXTERNAS	38,463.8 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 14cm- INTERNO	37,392.9 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE	11,516.2 kg (50 yrs)
Bloco Cerâmico 19cm- NÚCLEO ESTRUTURANTE- INTERNO	26,273.0 kg (50 yrs)

Used in the following Tally entries:

Brick

Description:

Mortar Type S (medium strength mortar) for use with masonry walls and flooring.

Life Cycle Inventory:

Dried mix: 78% sand  
17% cement  
4% calcium hydroxide  
1% limestone (12% water evaporates on drying)

Product Scope:

Cradle to gate

Transportation Distance:

By truck: 50 km\*

End-of-Life Scope:

55% Recycled into coarse aggregate  
45% Landfilled (inert material)

Module D Scope:

Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy

## LCI Data (continued)

<p>LCI Source:</p> <p>DE: Siliceous sand (grain size 0/2) ts (2017)</p> <p>DE: Cement (CBM I 32.5) (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>DE: Gravel (Grain size 2/32) (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>US: Tap water from groundwater ts (2017)</p>		<p>US: Tap water from groundwater ts (2017)</p> <p>US: Electricity grid mix ts (2014)</p> <p>US: Natural gas mix ts (2014)</p> <p>US: Diesel mix at filling station (100% fossil) ts (2014)</p> <p>US: Liquefied Petroleum Gas (LPG) (70% propane 30% butane) ts (2014)</p> <p>US: Light fuel oil at refinery ts (2014)</p>	
<p><b>Steel, reinforcing rod</b></p>		<p><b>210,791.7 kg</b></p>	
<p>Used in the following Revit families:</p> <p>15cm - Cerâmica 46x46cm</p> <p>15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA</p> <p>Escada</p> <p>Pilar retangular</p> <p>viga</p>		<p>26,068.4 kg (50 yrs)</p> <p>3,390.9 kg (50 yrs)</p> <p>1,184.4 kg (50 yrs)</p> <p>128,812.6 kg (50 yrs)</p> <p>51,335.4 kg (50 yrs)</p>	
<p>Used in the following Tally entries:</p> <p>Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi</p> <p>Precast concrete structural panel, hollow core</p>			
<p>Description:</p> <p>Common unfinished tempered steel rod suitable for structural reinforcement (rebar)</p>			
<p>Life Cycle Inventory:</p> <p>100% Steel rebar</p>			
<p>Product Scope:</p> <p>Cradle to gate</p>			
<p>Transportation Distance:</p> <p>By truck: 440 km*</p>			
<p>End-of-Life Scope:</p> <p>70% Recovered</p> <p>30% Landfilled (inert material)</p>			
<p>Module D Scope:</p> <p>Product has a 16.4% scrap input while remainder is processed and credited as avoided burden.</p>			
<p>LCI Source:</p> <p>GLO: Steel rebar worldsteel (2014)</p>			
<p><b>Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag</b></p>		<p><b>1,560,946.1 kg</b></p>	
<p>Used in the following Revit families:</p> <p>15cm - Cerâmica 46x46cm</p> <p>15cm - Cerâmica 46x46cm COBERTURA</p> <p>Escada</p> <p>Pilar retangular</p> <p>viga</p>		<p>446,672.0 kg (50 yrs)</p> <p>58,102.5 kg (50 yrs)</p> <p>20,293.8 kg (50 yrs)</p> <p>706,544.5 kg (50 yrs)</p> <p>329,333.4 kg (50 yrs)</p>	
<p>Used in the following Tally entries:</p> <p>Cast-in-place concrete, structural concrete, 4001-5000 psi</p> <p>Precast concrete structural panel, hollow core</p>			
<p>Description:</p> <p>Structural concrete, 4001-5000 psi, 30-39% slag. Mix design matches National Ready-Mix Concrete Association (NRMCA) Industry-wide EPD.</p>			
<p>Life Cycle Inventory:</p> <p>14% Cement</p> <p>6% Slag</p> <p>7% Batch water</p> <p>40% Coarse aggregate</p> <p>33% Fine aggregate</p>			
<p>Product Scope:</p> <p>Cradle to gate, excludes mortar</p> <p>Anchors, ties, and metal accessories outside of scope (&lt;1% mass)</p>			
<p>Transportation Distance:</p> <p>By truck: 50 km*</p>			
<p>End-of-Life Scope:</p> <p>55% Recycled into coarse aggregate</p> <p>45% Landfilled (inert material)</p>			
<p>Module D Scope:</p> <p>Avoided burden credit for coarse aggregate, includes grinding energy</p>			
<p>LCI Source:</p> <p>US: Portland cement PCA/ts (2014)</p> <p>DE: Pumice gravel (grain size 4/16) (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>DE: Gravel (Grain size 2/32) (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>DE: Fly ash (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>DE: Slag-tap granulate (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>DE: Expanded clay (EN15804 A1-A3) ts (2017)</p> <p>DE: Calcium nitrate ts (2017)</p> <p>DE: Sodium ligninsulfonate ts (2017)</p> <p>DE: Sodium naphthalene sulfonate [estimated] ts (2017)</p> <p>US: Sodium hydroxide (caustic soda) mix (100%) ts (2017)</p> <p>US: Colophony (rosin, refined) from CN pine gum rosin ts (2017)</p>			